

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Analýza impedančních vlastností
akumulačních článků**
**Analysis of impedance characteristics
of storage cells**

2011

Bc. Kratochvíl Miloslav

Prohlášení Studenta

Tímto prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem zde všechny literární zdroje a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Datum odevzdání

.....

Kratochvíl Miloslav

Poděkování:

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Petru Chlebišovi, CSc. za cenné rady a podnětné připomínky.

Abstrakt:

Práce se zabývá problematikou akumulčních článku. Jako akumulční článek je zde popsán superkapacitor. Uvedený popis základních principů poskytuje čtenáři základní představu o jeho vlastnostech a výhodách. Je zde popsán postup měření, která jsou důležitá pro stanovení náhradních parametrů. Dále je provedena impedanční analýza pomocí simulačního programu. Závěr práce se zabývá vyhodnocením získaných výsledků.

Klíčová slova:

Akumulční článek, kondenzátor, superkapacitor, kapacita, sériový odpor, svodový odpor. Impedanční charakteristika, simulace.

Abstract:

This thesis deals with the problem of accumulation cells and describes the possibility of using a supercapacitor as an accumulation cell. Description of the basic principles explains its characteristics and advantages. A process of measurement is mentioned that is important to setting of substitute parameters. This thesis then continues with impedance analysis which is done with the help of simulation software and is concluded with an evaluation of the gained results.

Keywords:

Storage cell, capacitor, supercapacitor, capacitance, series resistance, leak resistance. Impedance characteristic, simulation.

Seznam použitých symbolů a zkratek:

A	$[m^2]$	plošný obsah, plocha
AC	$[A]$	střídavý proud
C	$[F]$	kondenzátor, kapacita kondenzátoru
DC	$[A]$	stejnoseměrný proud
$\text{Im}(Z)$	$[\Omega]$	imaginární složka
L	$[H]$	indukčnost, cívka
Q	$[C]$	elektrický náboj
R	$[\Omega]$	elektrický odpor
$\text{Re}(Z)$	$[\Omega]$	reálná složka
R_{EPR}	$[\Omega]$	svodový odpor
R_{ESR}	$[\Omega]$	ekvivaletní sériový odpor
S	$[m^2]$	plošný obsah, plocha
U	$[V]$	elektrické napětí
V_0	$[V]$	počáteční napětí
V_{\min}	$[V]$	minimální napětí
W	$[J]$	energie
X_C	$[\Omega]$	kapacitní jalový odpor
X_L	$[\Omega]$	induktivní jalový odpor
Z	$[\Omega]$	impedance
ΔW	$[J]$	dodaná energie
f	$[Hz]$	kmitočet, frekvence
f_r	$[Hz]$	rezonanční kmitočet
$i(t)$	$[A]$	okamžitá hodnota proudu
t_d	$[s]$	časový úsek
$u(t)$	$[V]$	okamžitá hodnota napětí
X_M	$[A]$	měřená hodnota
X_S	$[A]$	skutečná hodnota
δ	$[m]$	tloušťka, tloušťka vrstvy
$\delta(x)$	$[\%]$	relativní chyba měření
$\Delta(x)$	$[-]$	absolutní chyba měřené veličiny
ε	$[F/m]$	permitivita
ε_0	$[F/m]$	permitivita vakua
ε_r	$[1]$	poměrná permitivita
τ	$[s]$	časová konstanta
ω	$[rad/s]$	úhlový kmitočet

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Teoretická část.....	8
2.1 Kondenzátory	8
2.2.1 Základní vztahy.....	8
2.2.1 Akumulace energie pomocí elektrického pole	10
2.2 Superkapacitor.....	10
2.2.1 Princip činnosti.....	11
2.2.2 Náhradní schéma superkapacitoru	14
2.2.3 Současné trendy v oblasti simulací superkapacitorů.....	15
3. Měření na superkapacitorech	17
3.1 Ověření vlastností článků	19
3.1.1 Chyba měření	20
3.1.2 Článek BCAP 3000	22
3.1.3 Článek BCAP 1200	23
3.1.4 Svodový odpor	25
3.1.5 Parazitní indukčnost.....	28
4. Simulace impedančních vlastností superkapacitoru	29
4.1 Impedanční popis	29
4.2 Popis programu OrCAD Capture	32
4.3 Simulace náhradních obvodů	32
4.3.1 Jednoduchý model.....	32
4.3.2 Žebříkový model	35
4.3.3 Model o dvou větvích.....	37
4.4 Vyhodnocení simulací.....	39
Závěr	41
Seznam použité literatury	42
Seznam příloh.....	43

1. Úvod

Tématem této diplomové práce je analýza impedančních vlastností akumulčních prvků. Hlavním akumulčním prvkem, kterým se tato práce bude zabývat, je superkapacitor, který patří do skupiny zařízení uchovávajících elektrickou energii pomocí elektrického pole. Díky svým vlastnostem se v poslední době dostává do popředí zájmu. Čím dál častěji se superkapacitory vyskytují v aplikacích výkonové elektroniky. K jejich hlavním přednostem patří vlastnost rychle akumulovat energii a následně odevzdat velké množství takto uložené energie. Další výhodou je jejich vysoká životnost, jež je dána také tím, že u nich nedochází – na rozdíl od baterií – k chemickým reakcím během akumulace energie. Právě vysoká rychlost nabití během několika sekund je možná kvůli malé vnitřní impedanci.

V první části této práce je proveden stručný popis, který nás seznamuje s funkcemi jak klasických kondenzátorů, tak superkapacitorů. Nalezneme zde základní vztahy, které jsou použitelné pro oba prvky. V současné době se superkapacitory objevují na poli akumulace elektrické energie, proto je zde provedeno srovnání vlastností jak akumulátorů, superkapacitorů tak klasických kondenzátorů. Konec kapitoly je věnován vývoji v oblasti studie náhradních obvodů superkapacitorů a modelům, které se používají pro různé typy simulací.

Ve druhé části této práce je popsán, postup jak stanovit hodnoty použitelné do náhradních obvodů. První fáze bude popisuje postup měření, kdy nabíjíme a vybíjíme superkapacitor konstantním proudem. Všechna provedená měření jsou uložena pomocí měřících přístrojů do datových souborů, které usnadňují samotnou analýzu. Z takto získaných dat je stanovena celková kapacita a sériový odpor. Dále je vyšetřován svodový odpor, který ovlivňuje svou velikostí rychlost samovybíjení superkapacitoru. V této kapitole je také proveden stručný výpočet chyby měření, která provázela celý cyklus testování vlastností superkapacitoru.

Třetí část této práce je zaměřena na simulace impedančních vlastností superkapacitoru. Jsou zde uvedeny modely, které jsou pro tento proces použity. Simulace charakteristik jsou provedeny v programu OrCAD Capture. Byly provedeny simulace, které měly stanovit impedanční charakteristiky. Následující simulace mají ukázat vliv parazitní indukčnosti. Následně je doložena analýza průběhů a celkové zhodnocení výsledků.

2. Teoretická část

2.1 Kondenzátory

Kondenzátor je součástí, ve které dochází k hromadění elektrického náboje. Skládá se ze dvou vodivých desek (*elektrod*) které jsou odděleny dielektrikem. Na jednotlivé elektrody se přivádí elektrické náboje opačné polarity; tyto náboje se vzájemně přitahují elektrickou silou. Částice s opačnými náboji, které jsou umístěny na deskách kondenzátoru, mají snahu přejít k sobě; tím by došlo k vzájemnému vyrušení elektrických nábojů. Tomuto stavu zabráňuje dielektrikum, které je umístěno mezi elektrodami kondenzátoru. Svou polarizací dielektrikum zmenšuje elektrické pole nábojů na elektrodách, což umožňuje umístit na nich větší množství náboje.

Deskový kondenzátor, který je tvořen dvěma plošnými vodiči o obsahu S ve vzdálenosti d , má na ploše těchto rovnoběžných vodičů vázané elektrické náboje, které mají stejnou velikost, ale opačné znaménko. Mluvíme – li o náboji na kondenzátoru, myslíme tím absolutní hodnotu náboje na jedné z jeho elektrod. Pokud se vyskytuje mezi oběma elektrodami nabitého kondenzátoru potenciálový rozdíl (*kondenzátor je připojen na napětí*), lze tento stav popsat následujícím vztahem:

$$C = \frac{Q}{U_{12}} = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (1)$$

v němž vztah $\varphi_1 - \varphi_2$ vyjadřuje rozdíl potenciálů, kde $\varphi_1 > \varphi_2$. V ideálním případě má protékat ideálním kondenzátorem proud, jenž je úměrný pouze časové derivaci napětí na jeho svorkách nezávisle na fyzikálních parametrech okolního prostředí a pracovních podmínkách. Je-li ideální kondenzátor zapojen v obvodu napájeném ze zdroje střídavého napětí, vzniká mezi jeho svorkovým napětím a proudem fázový posuv $\pi/2$, a to tak, že napětí je zpožděno za proudem.[1]

2.2.1 Základní vztahy

Ideální kondenzátor je popsán pouze elektrickou kapacitou. Má lineární Coulomb – Voltovou charakteristiku. Je popsán přesně uvedenými vztahy. Vztah mezi nábojem akumulovaným v kondenzátoru a napětím je:

$$Q = C \cdot U \quad (2)$$

úpravou vztahu (2) dostaneme rovnici v diferenciálním tvaru:

$$\frac{dq(t)}{dt} = C \frac{du(t)}{dt} \quad (3)$$

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (4)$$

Průběh napětí na kondenzátoru v závislosti na čase:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (5)$$

při $i(t) = \text{konst.} = I$ se vztah (5) upraví na tvar:

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = u(0) + \frac{I \cdot t}{C} \quad (6)$$

Rovnice (6) se používá pro výpočet kapacity kondenzátoru při známém nabíjecím proudu, velikosti napětí a doby nabíjení. Je-li kondenzátor používán jako akumulátor energie, pak je určující velikost uložené energie v kondenzátoru, kterou určíme ze vztahu:

$$W = \frac{1}{2} Q \cdot U = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (7)$$

Energie akumulovaná v kondenzátoru odpovídá velikosti práce potřebné k vytvoření napětí na kondenzátoru. Uvažujeme-li kapacitu závislou na geometrických rozměrech kondenzátoru a permitivitě materiálu umístěného mezi deskami elektrod, dostaneme vztah:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (8)$$

kde ε_r je relativní permitivita materiálu dielektrika, S je plocha elektrod [m^2], ($\varepsilon_r = 1$ pro vakuum, $\varepsilon_0 = 8.89 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ permitivita vakuu).

Vlastnosti kondenzátoru lze popsat následujícími parametry:

- velikost kapacity (*jmenovitá hodnota a tolerance*)
- napěťová závislost kapacity
- teplotní závislost kapacity
- izolační odpor kondenzátorů
- ztrátový činitel kondenzátorů
- kmitočtová závislost kapacity (*impedance kondenzátorů*)

- maximální provozní napětí kondenzátoru
- maximální provozní proud kondenzátoru
- časová změna parametrů

2.2.1 Akumulace energie pomocí elektrického pole

V současné době je jedinou součástí, jejíž pomocí lze akumulovat energii přímo v elektrické formě, kondenzátor. Ostatní typy akumulátorů uchovávají energii v chemické, mechanické a magnetické formě. Z těchto poznatků vyplývá, že pro akumulaci elektrické energie je kondenzátor nejvhodnější, protože před samotnou akumulací není nutná transformace energie do jiné formy.

Elektrolytický kondenzátor, jak ho známe dnes, není pro akumulaci elektrické energie vhodný z důvodů své nízké měrné energie, která se pohybuje kolem $0,01 \text{ Wh/Kg}$. V poslední době se ale na poli akumulace energie objevuje nový prvek, superkapacitor. Jedná se o součástku velice podobnou klasickému elektrolytickému kondenzátoru. Ve srovnání s akumulátory sice nedosahuje tak velké hustoty uložené energie, avšak ve všech ostatních parametrech je předčí. Jeho největší výhodou je schopnost akumulovat nebo dodávat v krátkém čase vysoké hodnoty nabíjecích či vybíjecích proudů, a dále jeho životnost. Porovnání základních vlastností akumulátorů, superkapacitoru a klasického kondenzátoru poskytuje tab. č. 1.[2]

Tab. 1: Porovnání vlastností akumulátorů, superkapacitoru a kondenzátorů [7]

	akumulátor	superkapacitor	klasický kondenzátor
hustota energie	(10 -100)Wh/kg	(1 - 10) Wh/kg	< 0,1 Wh/kg
měrný výkon	< 1000W/kg	< 100000 W/kg	< 100000W/kg
doba nabíjení	1 - 5 hod.	0,3 - 30 s	10-3 - 10-6 s
doba vybíjení	0,3 - 3 hod.	0,3 - 30 s	10-3 - 10-6 s
životnost	1000 cyklů	> 500000 cyklů	> 500000 cyklů
účinnost nabití/vybití	(0,7 - 0,85) %	(0,85 - 0,98) %	> 0,95 %

2.2 Superkapacitor

Jedná se o kondenzátory, někdy též nazývané elektrochemický dvouvrstvý kondenzátor, (*Electrochemical Double Layer Capacitor*) nebo ultrakapacitor. Dosahují obrovských kapacit, řádově až 10^3 F . V superkapacitoru lze uchovat řádově až 10 krát větší h energie, než je schopen

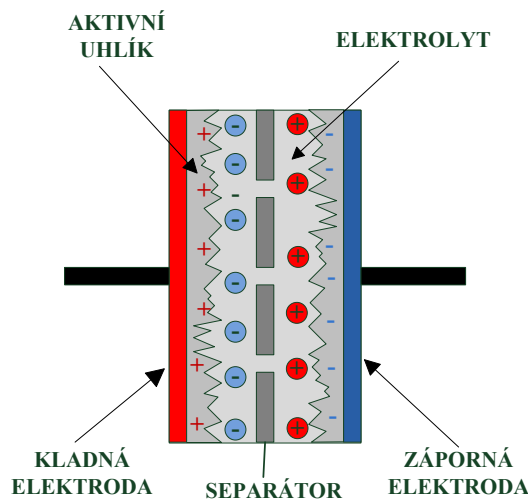
uchovat běžný kondenzátor. Malá hodnota vnitřního odporu umožňuje rychlé vybití. Špičkový výkon, jenž je superkapacitor schopen dodat, dosahuje hodnot kW na $1kg$ hmotnosti článku. [1]

2.2.1 Princip činnosti

U klasických kondenzátorů dochází k využití elektrické polarizace dielektrika umístěného mezi dva vodiče. Elektrolytický kondenzátor využívá polarizaci dielektrika, kde dielektrikum má formu tenké vrstvy oxidu hlinitého, elektrody tvoří hliníkový substrát a elektrolyt, do něhož je vložena kovová elektroda.

Superkapacity se proti běžným kondenzátorům liší ve svém principu. Nedochází v nich k vázání elektrického náboje polarizací atomů či molekul dielektrika, ale přesunem nabitých částic – iontů – v elektrolytu nebo elektrochemickou reakcí povrchu elektrody. Podle toho můžeme kondenzátory rozdělit do dvou skupin - na kondenzátory založené na vlastnostech elektrické dvojvrstvy a kondenzátory založené na změně a tvorbě složení povrchové vrstvy na elektrodě. Kondenzátor využívající elektrické dvojvrstvy je používanější.[1]

Kondenzátor na principu elektrické dvojvrstvy (EDLC) Ponoříme-li elektrodu do roztoku vhodné soli (*elektrolytu*) a přiložíme-li mezi tuto elektrodu a elektrolyt napětí, kladné a záporné ionty v elektrolytu se začnou přemisťovat. Dochází zde ke vzniku oblasti s prostorovým nábojem. Matematický popis je podobný jako pro popis polovodičových přechodů P-N nebo Schottkyho přechodu kov-polovodič. Kvůli vyšší koncentraci nosičů náboje je také kapacita prostorového náboje řádově vyšší. Při jejich tvorbě a zániku se jedná o čistě fyzikální proces; tento proces není svázán žádnou přestavbou chemických vazeb nebo sloučenin. Je proto dokonale vratný. Použijeme-li navíc materiál s velkým měrným povrchem jakým je například inertní uhlík, jehož měrný povrch dosahuje hodnot až $2000m^2/g$, získáme pak superkapacitor. Značnou nevýhodou těchto kondenzátorů je jejich nízké přípustné napětí. Voda jako elektrolyt nás omezuje napětím 1.1 až 1.3 V. Překročíme-li tuto hodnotu, nastane rozklad vody na kyslík a plynný vodík. U superkapacitorů se proto používají rozpouštědla, která dovolují zvýšit napětí na 2.3 až 2.8 V. Superkapacitor je tedy tvořen dvěma elektrodami obsahujícími dostatečné množství uhlíku s vysokým měrným povrchem a vhodným elektrolytem. Řez strukturou superkapacitoru znázorňuje obr. 1.



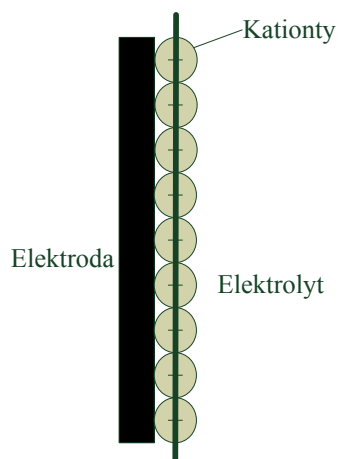
Obr. 1: Řez strukturou superkapacitoru

Pro popis elektrické dvojvrstvy byly vytvořeny různé modely (*Helmholtzův*, *Gouyův-Chapmanův*, *Sternův*, *BDM model*). Tyto modely jsou různě složité a poskytují jak různé možnosti využití, tak různě dokonalý popis struktury superkapacitoru. Rozbor tohoto tématu je však značně složitý a není náplní této práce. Proto bude proveden jen stručný popis modelů.[1]

Helmholtzův model se datuje do roku 1879. Model nám představuje elektrickou dvojvrstvu jako deskový kondenzátor, kdy jedna deska je přímo spojena s povrchem elektrody a druhá část je ponořena v kapalině. Model byl vytvořen pro popis systému s vysokými koncentracemi elektrolytů. Strukturu modelu zachycuje obr. 2. Kapacita dvojvrstvy je pak dána:

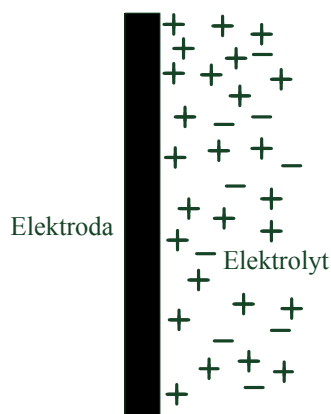
$$\frac{C}{A} = \frac{\varepsilon}{4 \cdot \mu \cdot \delta} \quad (9)$$

kde C [F] je kapacita, A [m²] představuje plochu povrchu tuhé látky, ε je relativní dielektrická konstanta elektrolytu mezi dvěma vrstvami a δ značí vzdálenost od povrchu elektrody do středu iontu. [1]



Obr. 2: Helmholtzův model elektrické dvojvrstvy

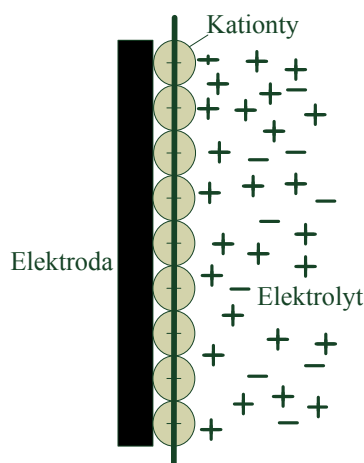
Gouyův – Chapmanův model vznikl v období let 1910 až 1913. Tvořili ho nezávisle na sobě pánové Goy a Chapmen. Rozdíl mezi tímto a předešlým modelem spočívá zejména v tom, že vzniklou dvojvrstvu netvoří jen jedna vrstva iontů uspořádaných těsně vedle sebe. Tento model naopak bere v úvahu jak koncentraci elektrolytu, tak tepelný pohyb iontů v elektrolytu. Pak si strukturu dvojvrstvy můžeme představit tak, že se skládá z iontů rozmístěných blízko povrchu a z iontů, které jsou rozptýleny v elektrolytu v určité vzdálenosti od povrchu elektrod. Model je uveden na obr. 3.[1]



Obr. 3: Gouyův – Chapmanův model elektrické dvojvrstvy

Sternův-Grahamův model byl popsán v roce 1924. Jedná se o model, který pracuje také s vlivem koncentrace elektrolytu a tepelným pohybem iontů v elektrolytu a přidává skutečnost, že velikost iontů je určena jeho rozměrem, který je dán pro specifický iont. Z toho můžeme

vyvodit, že střed iontu se nemůže přiblížit k elektrodě blíže než je vzdálenost poloviny velikosti daného iontu. Model je uveden na obr 4. [1]

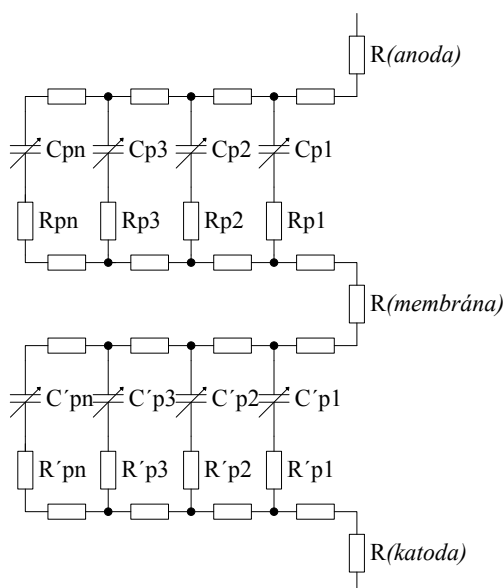


Obr. 4: Sternův-Grahamův model elektrické dvojvrstvy

2.2.2 Náhradní schéma superkapacitoru

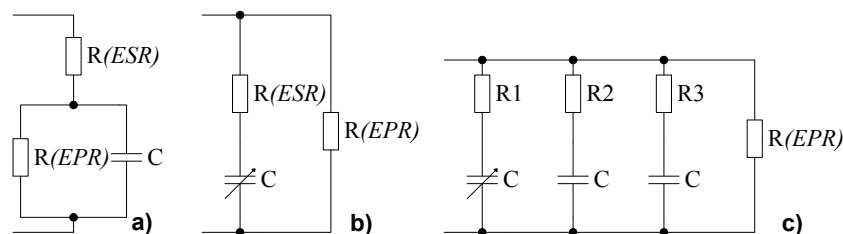
Náhradní ekvivalentní obvod superkapacitoru je řešen už od roku 1879, kdy došlo k jeho objevu. Od vzniku až po současnost se znalosti o těchto člancích značně prohloubily. Náhradní obvod tvořený složitou RC sítí nám ukazuje obr. 5. Jednotlivé větve tohoto zapojení nemají vzhledem k závislosti kapacity na napětí lineární charakter. Hodnoty odporů v náhradním schématu ovlivňují tyto parametry: [11]

- odpor materiálu elektrody
- odpor elektrolytického rozpouštědla
- šířka pórů
- pórovitost membrány
- kvalita propojení elektrody a kolektoru



Obr. 5: Náhradní model superkapacitoru

Je zřejmé, že podobný model je vzhledem k nelinearitám poměrně komplikovaný, proto byl zjednodušen. Méně komplikované modely jsou pro technické použití vhodnější. Na obr. 6 vidíme tři typy těchto zjednodušených modelů.

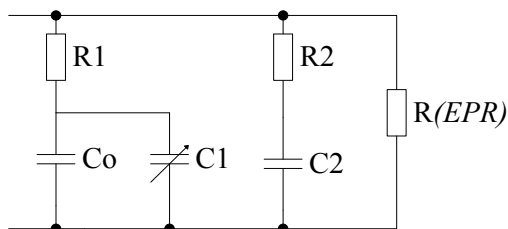


Obr. 6: Upravené modely a) klasický b) s proměnnou kapacitou c) třívětvý

2.2.3 Současné trendy v oblasti simulací superkapacitorů

V současné době je možno nalézt mnoho publikací, které se zabývají superkapacitory. Po prostudování této problematiky můžeme probíhající výzkumy rozdělit do dvou částí, a to na práce, které se zabývají popisem superkapacitoru ve stejnosměrné oblasti, doplněné o modelování tepelných závislostí, a na druhou část, kde je superkapacitor testován ve střídavé oblasti. Každá z uvedených oblastí se snaží nalézt shodu mezi skutečnými vlastnostmi a vlastnostmi simulovaných obvodů. Následně budou popsány základní obvody, které se pro takové simulace používají.

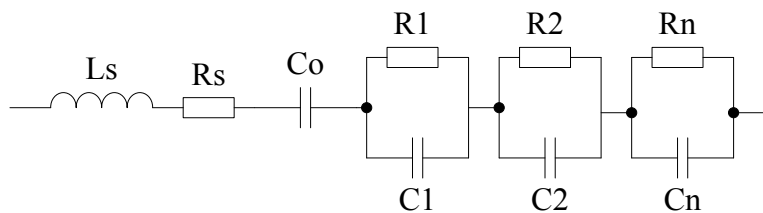
Stejnoseměrná oblast. Chování superkapacitoru v DC obvodu lze odhadnout podle reakce jednoduchého RC obvodu. Základní model, jak je znázorněn na obr. 6a), obsahuje ekvivalentní sériový odpor R_{ESR} , ideální kapacitu C a svodový odpor R_{EPR} . Existuje několik metod měření, pomocí nichž jsme schopni stanovit tyto tři parametry. Jedna z metod je používána jako standard a uvádí ji na svých stránkách i výrobci. Popis bude proveden v dalších kapitolách, kde se bude práce zabývat ověřením vlastností použitých článků a budou stanovovány hodnoty pro náhradní obvody. V současné době se dá říci, že při simulacích v DC oblasti se používá nejvíce schéma, které je uvedeno na obr. 7. Uvedený model je v anglické literatuře uváděn pod názvem „Two Branches model“. Ze zapojení jde patrně, že jsou zde zanedbány indukčnosti přívodů. Toto zanedbání je typické právě pro obvody, které jsou řešeny v DC oblasti.



Obr.7: DC model o dvou větvích

Výhody modelu spočívají v malém množství obvodových komponent, jednoduchosti stanovení obvodových parametrů a stabilitě při simulacích vlivu teploty.[11]

Střídavá oblast. Problematika AC měření je náročnější než téma uvedené dříve. U mnoha článků lze nalézt vhodné modely, které jsou použity pro simulace, a následné srovnání s měřeními daty. Takový obvod je například uveden na obr. 8.



Obr.8: AC model superkapacitoru

Uvedený model je ale poměrně složitý, což přináší značné problémy při stanovování obvodových parametrů. V současné době je tento problém řešen relativně novou metodou, která

se nazývá „*Impedanční spektroskopie*“. Tato metoda je schopna charakterizovat mnoho elektrických vlastností materiálů a jejich propojení s elektricky se nabíjejícími elektrodami. Používá se k prozkoumání dynamických jevů vázaných nebo volných nábojů v objemu nebo na ploše jakéhokoliv druhu materiálu, ať už kapalného nebo pevného. Jedná se však o metodu, která spadá spíše do materiálového inženýrství.[9]

3. Měření na superkapacitorech

Pro účely této práce byly použity dva články superkapacitoru od výrobce Maxwell^R Technologies. Jedná se o články o kapacitě $1200F/2,7V$ a $3000F/2,7V$. Tyto články byly před samotným měřením impedančních vlastností podrobeny měření za účelem ověření vlastností a stanovení parametrů pro náhradní obvod. V tab. č. 2. jsou základní parametry testovaných článků.

Tab. 2: Základní parametry testovaných článků [6]

Vlastnosti	BCAP 1200	BCAP 3000	
Jmenovitá kapacita	1200	3000	[F]
Jmenovité napětí	2.7	2.7	[V]
R_{ESR} DC	0.58	0.29	[mΩ]
R_{ESR} AC	0.44	0.24	[mΩ]
Max. trvalý proud	81	147	[A]
Max. špičkový proud, 1 sec	955	2170	[A]
Teplotní pracovní rozsah	-40 až +65	-40 až +65	[°C]
Životnost	10	10	[rok]
Počet cyklů	1	1	[milion]
Váha	0.26	0.51	[kg]

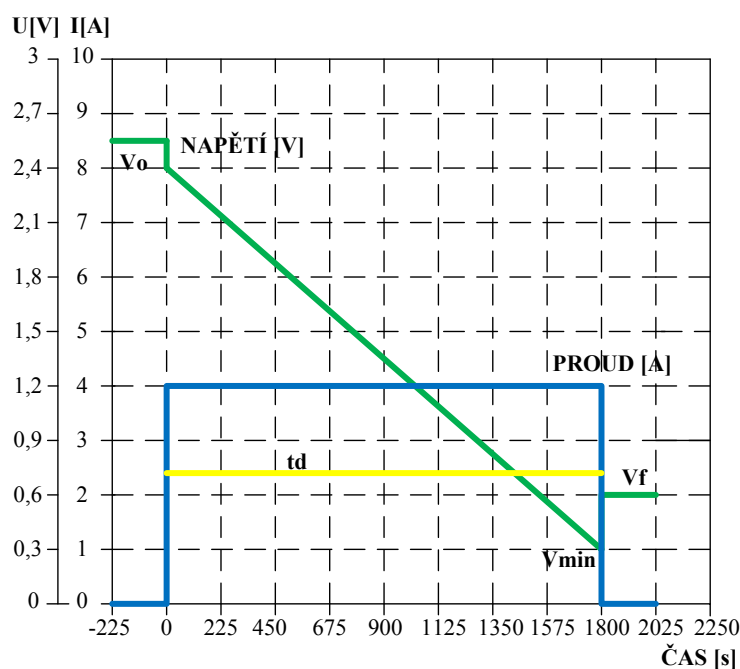
Na obou člancích byla provedena měření, která měla ověřit vlastnosti těchto článků. Měření probíhalo v cyklu nabíjení konstantním proudem o velikosti $4A$ z minimálního napětí až do napětí $2.5V$. Hodnota napětí byla stanovena s ohledem na bezpečnost článku. Dále pak bylo provedeno vybití konstantním proudem do minimální hodnoty napětí, a to proudem $4A$. Průběh

napětí při nabíjení a vybíjení byl zaznamenán a následně analyzován. Byla pak stanovena výsledná kapacita každého článku.

Postup pro stanovení hodnot superkapacitoru může být různý. V této práci byl použit postup, který popisuje výrobce Maxwell^R Technologies na svých stránkách. Pro celé měření je nutno použít níže uvedené přístroje, které nám umožní nabíjení a vybíjení konstantním proudem:

- napájecí zdroj nastavitelný na konstantní proud
- zátěž nastavitelná na konstantní proud
- přístroj na měření napětí v závislosti na čase
- přístroj na měření proudu v závislosti na čase

Pro poslední dva zmiňované body je dobré, když jsou přístroje schopny provést záznam do textového souboru. V našem případě byly pro testování vlastností superkapacitoru použity přístroje: laboratorní zdroj *DIAMETRAL (P230R51D)*, jako zátěž byla použita *Elektronická DC zátěž[13]*. Jako měřicí přístroje pak *LeCroy Vehicle Bus Analyzer (VBA64Xi)* a *Agilent 34405A*. Na obr. 9 je možno vidět idealizovaný průběh napětí a proudu při vybíjení superkapacitoru.



Obr.9: Průběh napětí a proudu při vybíjení

V_0 – reprezentuje počáteční napětí na superkapacitoru, V_{min} – je minimální napětí, kdy je superkapacitor schopen dodávat konstantní proud, V_f – je hodnota napětí, která se objeví na článku po určitém časovém úseku (*v literatuře je uváděn čas 5s*). Dále pak t_d – představuje čas vybití superkapacitoru z napětí V_0 na napětí V_f . Pro výpočet celkové kapacity se pak může použít vztah:

$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{V_0 - V_f} \quad (10)$$

kde I_d je hodnota konstantního vybíjecího proudu. Hodnotu kapacity můžeme pro určité napětíové hladiny stanovit také pomocí vztahu (2), kdy jeho úpravou dostaneme:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{I \cdot t}{U} \quad (11)$$

Dále pak můžeme stanovit ekvivalentní stejnosměrný sériový odpor R_{ESR} , a to podle vztahu:

$$R_{ESR} = \frac{V_f - V_{min}}{I_d} \quad (12)$$

Uložená energie je dána vztahem:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_0^2 \quad (13)$$

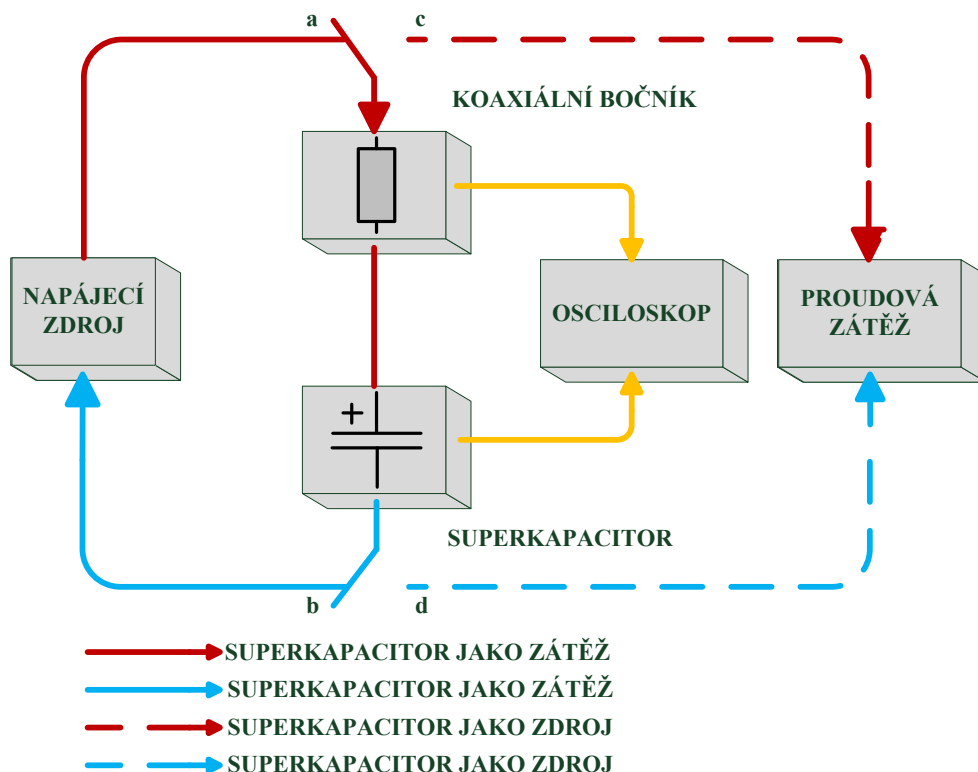
Dodaná energie se pak vypočte podle vztahu:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_0^2 - V_f^2) \quad (14)$$

3.1 Ověření vlastností článků

Kontrolní měření bylo provedeno podle pokynů výrobce, který popisuje, jak s články pracovat, aby nedošlo k poškození. Blokové schéma měřicího stanoviště je uvedeno na obr. 10. Při připojení větve superkapacitoru kontakty *a*, *b* dochází k nabíjení článku, při přepnutí kontaktů *c*, *d* dochází k přepnutí větve na zátěž a článek je vybíjen. Celý průběh měření byl zaznamenán pomocí osciloskopu, který umožňoval měřená data zpracovat do textové podoby,

což velmi usnadňuje následnou analýzu. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze 1 a 2.



Obr.10: Blokové schéma měření vlastností superkapacitoru

3.1.1 Chyba měření

Každé měření je prováděno s určitou chybou. Proto nejsme schopni měřením získat absolutně správnou hodnotu měřené veličiny. Použitím přesných přístrojů a volbou správné měřicí metody se můžeme ke správné hodnotě pouze přiblížit. Z naměřených hodnot lze vypočítat relativní chybu měření podle vztahu:

$$\Delta(x) = X_M - X_S \quad (15)$$

$$\delta(x) = \frac{\Delta(x)}{X_S} \cdot 100[\%] \quad (16)$$

kde $\Delta(x)$ - reprezentuje absolutní chybu měřené veličiny, X_M - naměřenou hodnotu, X_S - pravou hodnotu a $\delta(x)$ - relativní chybu měření. Protože proces nabíjení a vybíjení byl prováděn na dvou přístrojích, nabíjecím zdroji a elektronické zátěži, bude chyba vypočítána pro každý cyklus samostatně.

Cyklus nabíjení:

Pro článek BCAP 3000 byly stanoveny tyto hodnoty:

$$X_M - 4,043 \text{ [A]}, X_S - 4,010 \text{ [A]}$$

$$\Delta(x) = X_M - X_S = 4,043 - 4,010 = 0,033 \quad (17)$$

$$\delta(x) = \frac{\Delta(x)}{X_S} \cdot 100 = \frac{0,033}{4,01} \cdot 100 = 0,8 \% \quad (18)$$

Pro článek BCAP 1200 byly stanoveny tyto hodnoty:

$$X_M - 3,959 \text{ [A]}, X_S - 4,015 \text{ [A]}$$

$$\Delta(x) = X_M - X_S = 3,959 - 4,015 = 0,056 \quad (19)$$

$$\delta(x) = \frac{\Delta(x)}{X_S} \cdot 100 = \frac{0,056}{4,015} \cdot 100 = 1,3 \% \quad (20)$$

Cyklus vybíjení:

Pro článek BCAP 3000 byly stanoveny tyto hodnoty:

$$X_M - 3,9409 \text{ [A]}, X_S - 4 \text{ [A]}$$

$$\Delta(x) = X_M - X_S = 3,9409 - 4 = 0,0591 \quad (21)$$

$$\delta(x) = \frac{\Delta(x)}{X_S} \cdot 100 = \frac{0,0591}{4} \cdot 100 = 1,4 \% \quad (22)$$

Pro článek BCAP 1200 byly stanoveny tyto hodnoty:

$$X_M - 3,81507 \text{ [A]}, X_S - 4 \text{ [A]}$$

$$\Delta(x) = X_M - X_S = 3,81507 - 4 = 0,1849 \quad (23)$$

$$\delta(x) = \frac{\Delta(x)}{X_S} \cdot 100 = \frac{0,1849}{4} \cdot 100 = 4,6 \% \quad (24)$$

Jak lze vidět, chyby měření jsou malé. Pouze u vybíjení článku BCAP 1200 se chyba pohybuje kolem 4,6%, což může ovlivňovat kvalita zátěže a nastavený vybíjecí obvod.

3.1.2 Článek BCAP 3000

Stanovení kapacity a ekvivaletního stejnosměrného sériového obvodu byly provedeny podle vzorců (10) až (14). Pro výpočet kapacity byly stanoveny hodnoty, které jsou uvedeny v tab. č. 3. Celkový průběh nabíjení a vybíjení článku je uveden na obr. 11.

Tab. 3: Hodnoty pro výpočet vlastností článku BCAP 3000

Režim	V_0 [V]	V_1 [V]	V_{\min} [V]	V_f [V]	I_d [A]	t_d [s]
Vybíjení	2,4757	2,485	0,0828	0,0929	3,9	1630

Výpočet celkové kapacity je proveden podle vztahu (10):

$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{V_0 - V_f} = \frac{3,9 \cdot 1630}{2,4757 - 0,0898} = 2733F \quad (25)$$

Pro určení hodnoty R_{ESR} jsme použili dvě metody. Provedli jsme proto výpočty jak podle vztahu (12), tak jsme také použili postup, který je popisován v literatuře [4], kdy je vyšetřováno napětí po připojení superkapacitoru k zátěži. Byly stanoveny hodnoty uvedné v tab. č. 3:

Při připojení zátěže:

$$R_{ESR} = \frac{\Delta U_0}{I_d} = \frac{0,01}{3,9} = 2,5m\Omega \quad (26)$$

Při odpojení zátěže:

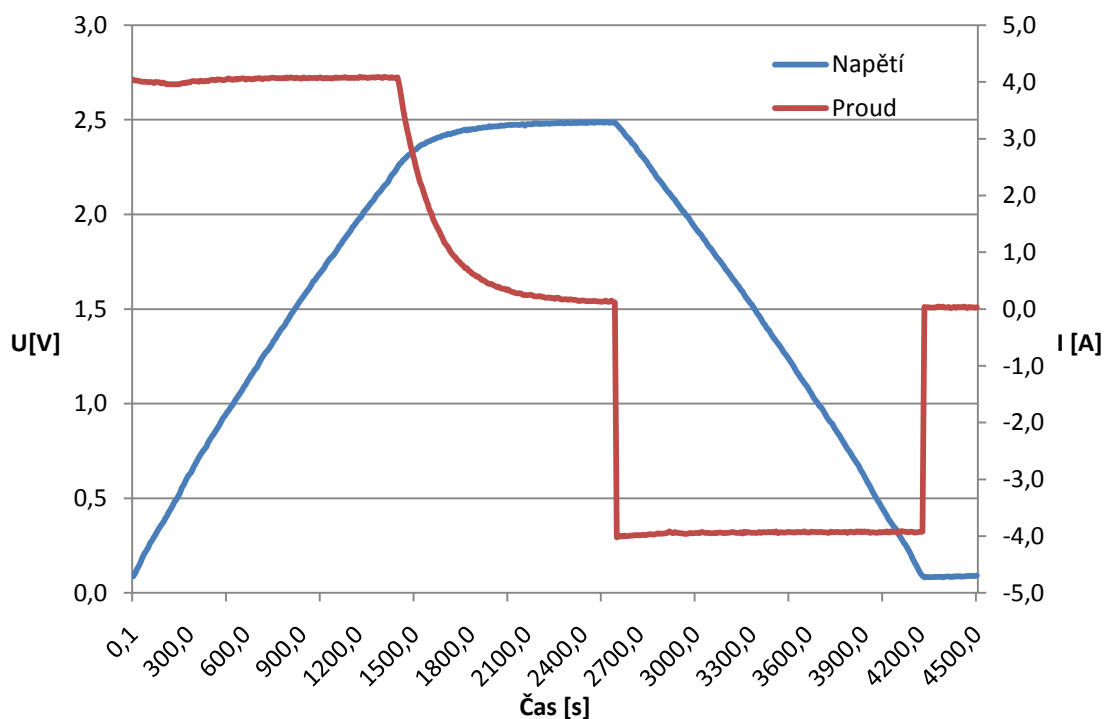
$$R_{ESR} = \frac{\Delta U_{f-\min}}{I_d} = \frac{0,01}{3,9} = 2,5m\Omega \quad (27)$$

Uvedené výpočty vykazují značnou shodu, proto budeme tyto hodnoty považovat za použitelné při další práci. Uložená energie je vypočítána podle vztahu (13).

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 2667 \cdot 2,4757^2 = 8173J \quad (28)$$

Dodaná energie je pak:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_0^2 - V_f^2) = \frac{1}{2} \cdot 2667 \cdot (2,4757^2 - 0,0929^2) = 8161J \quad (29)$$



Obr.11: Průběh nabíjení a vybíjení článku BCAP 3000

3.1.3 Článek BCAP 1200

Hodnoty pro výpočet kapacity jsou uvedeny v tab. č. 4. Postup výpočtu je totožný s postupem měření u předešlého článku. Průběh nabíjení a vybíjení je uveden na obr. 12

Tab. 4: Hodnoty pro výpočet vlastností článku BCAP 1200

Režim	V_0 [V]	V_1 [V]	V_{\min} [V]	V_f [V]	I_d [A]	t_d [s]
Vybíjení	2,475	2,485	0,196	0,201	3,8	690

Výpočet kapacity:

$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{V_0 - V_f} = \frac{3,8 \cdot 690}{2,47 - 0,201} = 1160F \quad (30)$$

Při připojení zátěže:

$$R_{ESR} = \frac{\Delta U_0}{I_d} = \frac{0,018}{3,8} = 4,7 m\Omega \quad (31)$$

Při odpojení zátěže:

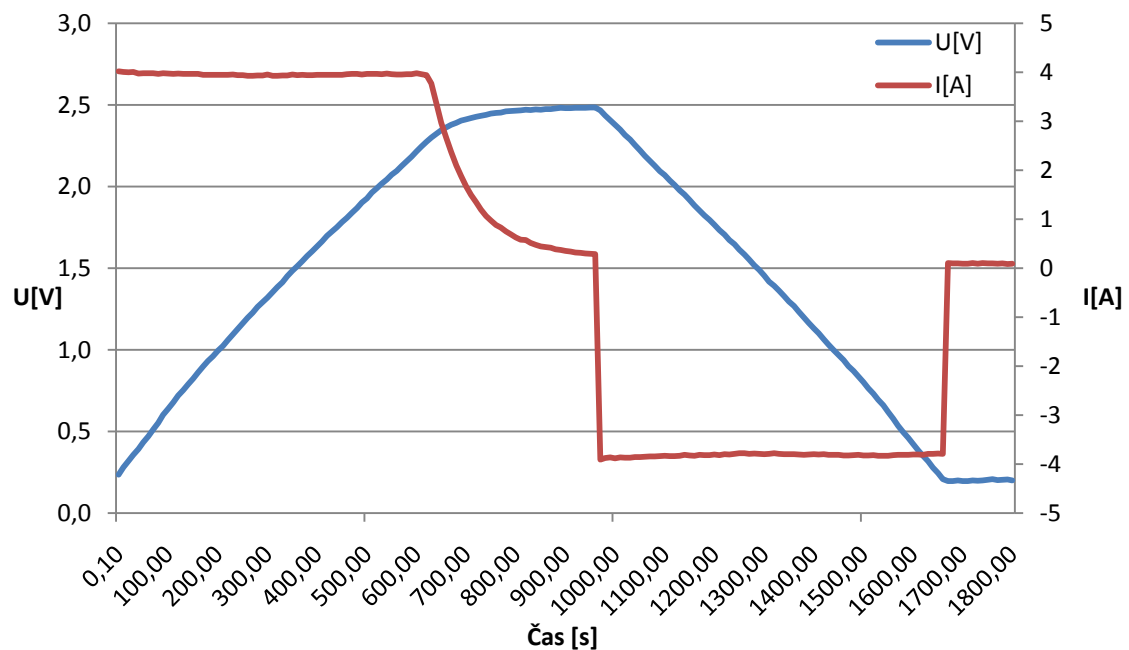
$$R_{ESR} = \frac{\Delta U_{f-\min}}{I_d} = \frac{0,005}{3,8} = 1,43 m\Omega \quad (32)$$

Z uvedených výpočtů je patrný značný rozdíl mezi vztahy (31) a (32). Může na něj mít i vliv hodnota proudu při vybíjení. Proto při následné práci budou oba výsledky ověřeny. Uložená energie je vypočítána:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 1160 \cdot 2,47^2 = 3538 J \quad (33)$$

Dodaná energie je pak:

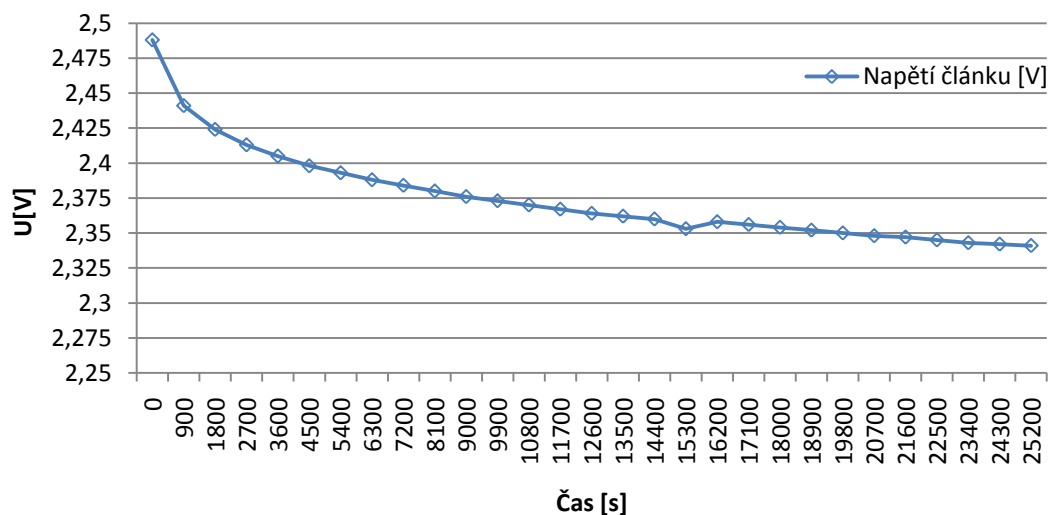
$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_0^2 - V_f^2) = \frac{1}{2} \cdot 1160 \cdot (2,47^2 - 0,201^2) = 3515 J \quad (34)$$



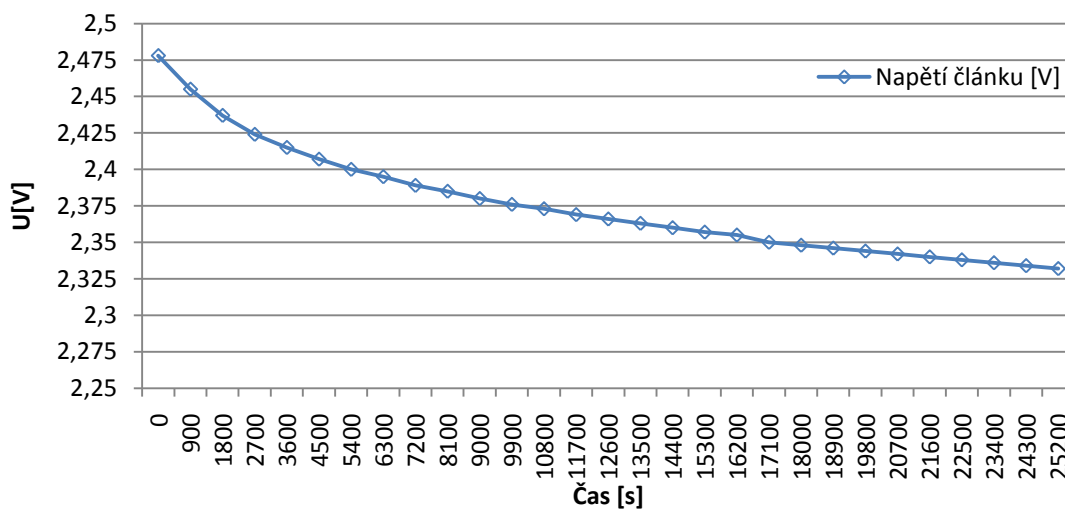
Obr.12: Průběh nabíjení a vybíjení článku BCAP 1200

3.1.4 Svodový odpor

Superkapacitory, stejně jako jiné akumulátory, podléhají samovybíjení. Proto byly oba články testovány na samovybíjení. Články byly nabity na hodnotu napětí $2,5V$, pak následovalo odpojení od zdroje. Hodnoty byly měřeny v časových intervalech voltmetrem s velkým vnitřím odporem. Hodnoty naměřené pro oba články jsou uvedeny v příloze 3 a 4. Obr. 13 a 14 zachycuje průběh samovybíjení.



Obr.13: Průběh samovybíjení pro článek BCAP 3000



Obr.14: Průběh samovybíjení pro článek BCAP 12000

Při samovybíjení můžeme pro výpočet odporu použít vztah:

$$u(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (35)$$

kde $u(t)$ je okamžitá hodnota napětí, U_0 je počáteční napětí článku a τ časová konstanta článku. Pro určení časové konstanty jsme vybrali několik bodů z průběhu vybíjení článku, jak je uvedeno v tab. č. 5 a 7.

Tab. 5: Určení časové konstanty při samovybíjení článku BCAP 3000

ÚSEK	t	U_0	$u(t)$	$u'(t)$	Rozdíl	τ
[-]	[s]	[V]	[V]	[V]	$u(t)-u'(t)$	[s]
1	900	2,356	2,354	2,3533	-0,001	3053500
<u>2</u>	<u>1800</u>	<u>2,356</u>	<u>2,352</u>	<u>2,3546</u>	<u>0,002</u>	<u>3053500</u>
3	2700	2,356	2,35	2,3539	0,003	3053500
4	3600	2,356	2,348	2,3532	0,005	3053500
5	4500	2,356	2,347	2,3525	0,006	3053500
6	5400	2,356	2,345	2,3518	0,007	3053500
7	6300	2,356	2,343	2,3511	0,008	3053500
8	7200	2,356	2,342	2,3505	0,008	3053500
9	8100	2,356	2,341	2,3498	0,008	3053500

Z výpočtů vyplývá, že se kapacita superkapacitoru mění nelineárně. Proto byla kapacita vypočtena pro různé napěťové hladiny, jak je uvedeno v tab. č 6. Pro výpočet byl použit vztah (11).

Tab. 6: Kapacita pro různé hladiny napětí

U	BCAP1200	BCAP3000
[V]	[F]	[F]
0,5	544	1831
<u>1</u>	<u>739</u>	2160
1,5	937	2320
2	1041	2460

Příklad výpočtu:

$$C = \frac{I \cdot t}{U} = \frac{3,9 \cdot 200}{1} = 739F \quad (36)$$

Následuje stanovení časové konstanty; pro samotný výpočet byl použit vztah (25). Hodnota časové konstanty a následná kontrola je uvedena v tab. č. 5.

$$u'(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 2,356 \cdot e^{-\frac{1800}{3053500}} = 2,3546 \quad (37)$$

$$\text{Rozdíl} = u(t) - u'(t) = 2,352 - 2,3546 = 0,002 \quad (38)$$

ze vztahu (28) je patrné, že rozdíl je velmi malý. Stanovená konstanta je vyhovující. Hodnotu odporu pak určíme:

$$R = \frac{\tau}{C} = \frac{3053500}{2460} = 1241\Omega \quad (39)$$

Tab. 7: Určení časové konstanty při samovybíjení článku BCAP 1200

ÚSEK	t	U ₀	U(t)	u'(t)	Rozdíl	τ
[-]	[s]	[V]	[V]	[-]	u(t)-u'(t)	[s]
<u>1</u>	<u>900</u>	<u>2,350</u>	<u>2,348</u>	<u>2,3480</u>	<u>0,00</u>	<u>1053449</u>
2	1800	2,350	2,346	2,3460	0,00	1053449
3	2700	2,350	2,344	2,3440	0,00	1053449
4	3600	2,350	2,342	2,3420	0,00	1053449
5	4500	2,350	2,340	2,3400	0,00	1053449
6	5400	2,350	2,338	2,3380	0,00	1053449
7	6300	2,350	2,336	2,3360	0,00	1053449
8	7200	2,350	2,334	2,3340	0,00	1053449
9	8100	2,350	2,332	2,3320	0,00	1053449

Příklad výpočtu:

$$u'(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 2,350 \cdot e^{-\frac{900}{1053449}} = 2,348 \quad (40)$$

$$\text{Rozdíl} = u(t) - u'(t) = 2,348 - 2,348 = 0,00 \quad (41)$$

Výpočet svodového odporu:

$$R = \frac{\tau}{C} = \frac{1053449}{1074} = 980\Omega \quad (42)$$

Jak lze vidět, svodový odpor má velikost v řádech ohmů. Důležitou roli zde ale hraje velikost kapacity. Přesto se dá říci, že superkapacitory v tomto ohledu zaostávají za klasickými kondenzátory a elektrochemickými akumulátory. Zde pokračuje značný vývoj ze strany výrobců, aby se docílilo zlepšení tohoto parametru.

3.1.5 Parazitní indukčnost

Určení parazitní indukčnosti superkapacitoru se nepodařilo korektně provést. V současné době existuje málo způsobů, jak se dobrat k určení této hodnoty. Nejpoužívanější je v současné době elektrochemická impedanční spektroskopie. Jedná se o vysoce citlivý experimentální proces, který je určen ke stanovení parametrů daného systému. Pracuje na základě použití periodického signálu s velmi malou amplitudou, což vede k malým koncentračním změnám ve zkoušeném systému. Tento princip je důležitý u systémů, které jsou citlivé na tzv. koncentrační polarizaci. Metoda umožňuje aplikovat veliký rozsah frekvencí budicího signálu. To přináší možnost charakterizovat systém, který zahrnuje více propojených dějů s odlišnou kinetikou. Při měření se doporučuje nepřekračovat hodnotu amplitudy budicího signálu přes hodnotu 10 mV . Samotné měření probíhá v širokém rozsahu frekvencí vstupního signálu. To umožňuje účinně separovat jednotlivé prvky, které se účastní na práci celého systému, klade však velké nároky na použité přístrojové vybavení.

Protože toto speciální vybavení nebylo v době zpracovávání diplomové práce k dispozici, nepodařilo se v této fázi práce zajistit hodnoty parazitní indukčnosti měřením. Byly však použity hodnoty z publikace [12], kde byly nalezeny hodnoty parazitní indukčnosti pro námi používané články. Autoři zde uvádějí hodnotu 17 nH až 22 nH pro články série K2, do které právě námi používané články spadají. Dalším pomocným údajem je skutečnost, že články s kapacitou jako je 2600 F se blíží hodnotě 17 nH . Tyto hodnoty proto budou použity při simulacích, které budou pro účely práce základní metodou dalšího zkoumání.

4. Simulace impedančních vlastností superkapacitoru

4.1 Impedanční popis

Amplitudu a směr rovinného vektoru v daném systému můžeme popsat vztahem:

$$Z = a + jb \quad (43)$$

j – je imaginární číslo, které je popsáno vztahem:

$$j = \sqrt{-1} = \exp\left(\frac{j \cdot \pi}{2}\right) \quad (44)$$

Ze vztahu lze vyvodit, že dochází k rotaci vektoru proti směru hodinových ručiček vzhledem k ose x . Systém je pak rozdělen tak, že reálná část impedance Z je ve směru reálné osy x , směr osy y pak odpovídá imaginární části b impedance. Napíšeme – li:

$$Z(\omega) = Z' + jZ'' \quad (45)$$

můžeme říci, že impedance je vektor, který může být zobrazen v různých systémech souřadnic, jako je pravoúhlý nebo polární systém. Reálná část pak je:

$$\text{Re}(Z) = Z' = |Z| \cdot \cos(\theta) \quad (46)$$

imaginární část je

$$\text{Im } g(Z) = Z'' = |Z| \cdot \sin(\theta) \quad (47)$$

úhel svírající vektor $|Z|$ s osou x je:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Z''}{Z'}\right) \quad (48)$$

pak

$$|Z| = \left[(Z')^2 + (Z'')^2\right]^{0.5} \quad (49)$$

Z - může být vyjádřeno v polárním tvaru pomocí vztahu:

$$|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{0.5} \quad (50)$$

Definujeme – li úhel θ jako:

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{Z''}{Z'}\right) \quad (51)$$

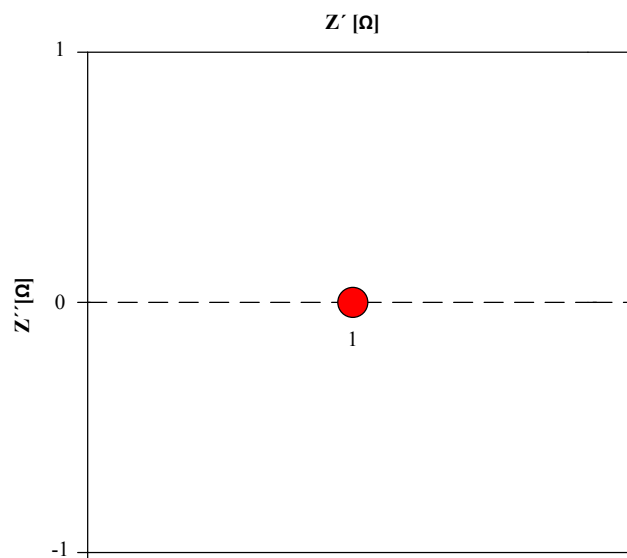
přidáváme negativní znaménko záměrně, a to proto, aby Z'' vyšlo negativně, zatímco Z' zůstane kladné. Impedance je komplexní veličinou a nabývá reálné hodnoty pouze tehdy, když $\theta = 0$. Pak lze napsat:

$$Z(\omega) = Z'(\omega) \quad (52)$$

Tento vztah pak vyjadřuje čistě odporový charakter a můžeme říci, že impedance je frekvenčně nezávislá. Platí-li tedy, že impedance má pouze odporový charakter:

$$Z_R = R \quad (53)$$

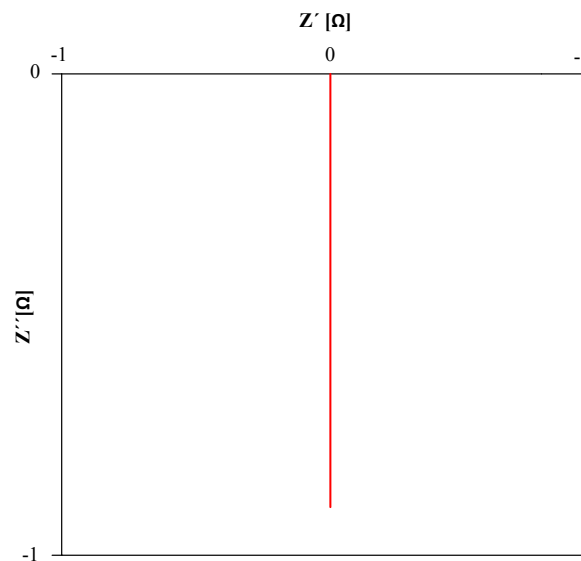
pak v Nyquistově rovině bude odpor reprezentován pouze bodem na reálné ose x.



Obr.15: Průběh impedance, která má jen odporový charakter

Následně také platí průběh, kdy má impedance pouze kapacitní charakter, jak vidíme na obr. 16, což lze vyjádřit vztahem:

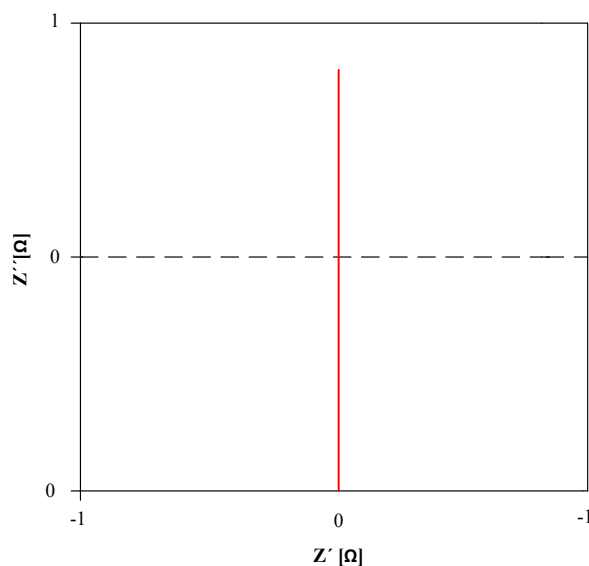
$$Z_c = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \quad (54)$$



Obr.16: Repräsentace impedance kapacitního charakteru

Stavu, kdy má impedance induktivní charakter, odpovídá obr. 17 a jak lze vidět, její velikost je rovna kladné imaginární hodnotě.

$$Z_L = j \cdot \omega \cdot L \quad (55)$$



Obr.17: Repräsentace impedance indukčního charakteru

4.2 Popis programu OrCAD Capture

Programový jazyk Spice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) se poprvé objevil na univerzitě v Berkeley v Kalifornii. V případě Pspice se jedná o komerční verzi, která je registrována pod ochrannou známkou OrCAD Corporation.

V balíku OrCAD Capture nalezneme ucelenou nabídku nástrojů použitelných pro návrh elektronických schémat, kdy může konstruktér využít možnost přechodu do jiných systémů, jako např. analogové a číslicové simulace, návrhu programovatelných obvodů nebo samotného návrhu plošných spojů. Základním stavebním kamenem celého návrhu je rozsáhlá knihovna schematických značek, symbolů a součástek. Tyto prvky jsou pro své použití definovány matematickým modelem, který následně dovoluje provedení požadované simulace.

Postup, jak vzniká samotné simulační schéma, můžeme rozdělit do několika bodů. Prvním úkolem je vyvolání dané schematické značky z knihovny, následuje umístění do pracovního prostředí a nakonec propojení vývodů s jinými součástkami, které tvoří celkový návrh obvodu. Samotný návrh může probíhat jak v jednoduché základní rovině, kdy pracujeme s jedním obvodem, tak v hierarchickém návrhu, kdy jednotlivá schémata tvoří celkový komplikovaný obvod.

Samotný program umožňuje náročné číslicové a analogové simulace. Výhodou je možnost dobré kontroly navrženého obvodu. Program umožňuje mnoho výstupů, které mohou být použity do výrobní dokumentace, jako např. možnost tisku schémat obvodu, seznam použitých součástek a další.

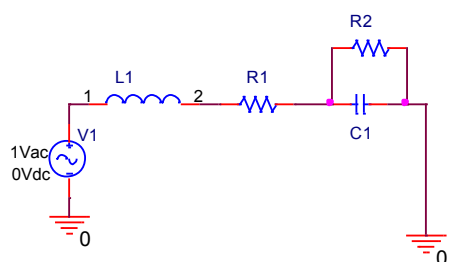
4.3 Simulace náhradních obvodů

Po prostudování tématu týkajícího se simulací superkapacitorů byly vybrány modely, které reprezentovaly nejpoužívanější typy ve svých oblastech. Jako hodnoty pro náhradní modely byly použity jak údaje uváděné k těmto modelům, tak hodnoty, které byly naměřeny a vypočteny v kapitole 3.

4.3.1 Jednoduchý model

Model superkapacitoru lze sestavit pomocí některých standardních komponent, které nalezneme v programu Orcad Capture. Jako první model byl použit obvod, který je uveden na obr. 18. Jedná se o jednoduché zapojení simulovaného obvodu v programu OrCAD Capture, které je totožné s náhradním obvodem klasického kondenzátoru. Legenda obsahuje hodnoty, které byly pro simulaci použity; jedná se o naměřené hodnoty a hodnoty z literatury [6]. Byla

provedena simulace impedance. Průběhy jsou uvedeny na obr. 19 až 21. Pro přehlednost je zde v textu uveden vždy jen jeden výstup simulace, zbývající dva jsou přiloženy v příloze.



Hodnoty dosazené do simulace

BCAP3000	BCAP1200	Prevzaté hodnoty
L1=17nH	L1= 22nH	L1= 22nH
R1=0,0025	R1=0,0047	R1=0,0035
R2=1241	R2=980	675
C1=2733	C1=1160	C1=2000

Obr.18: Schéma zapojení jednoduchého modelu v OrCAD Capture

Kapacita C_l nám určuje množství uložené energie a rychlost změn energetické hladiny, L_l zahrnuje indukčnost přívodů superkapacitoru. Sériový odpor R_l ovlivňuje ztráty během nabíjení a vybíjení. Odpor R_2 , který je připojen paralelně s kondenzátorem, reprezentuje efekt samovybíjení článku.

Jak lze vidět na obr. 18, jedná se o zapojení jednoduchého rezonančního obvodu. Každý takovýto obvod se vyznačuje specifickou vlastností, a to tzv. rezonančním kmitočtem f_r , při kterém se obvod chová jako činný reálný odpor. To pro nás znamená, že ačkoliv testujeme obvod na vliv střídavého proudu, v určitém stavu nevzniká žádný fázový posuv mezi proudem a napětím. Tento stav, který se projevuje pouze reálným odporem, je označován jako rezonance. Příslušný kmitočet se nazývá rezonanční kmitočet f_r . Určíme jej pomocí vztahu:

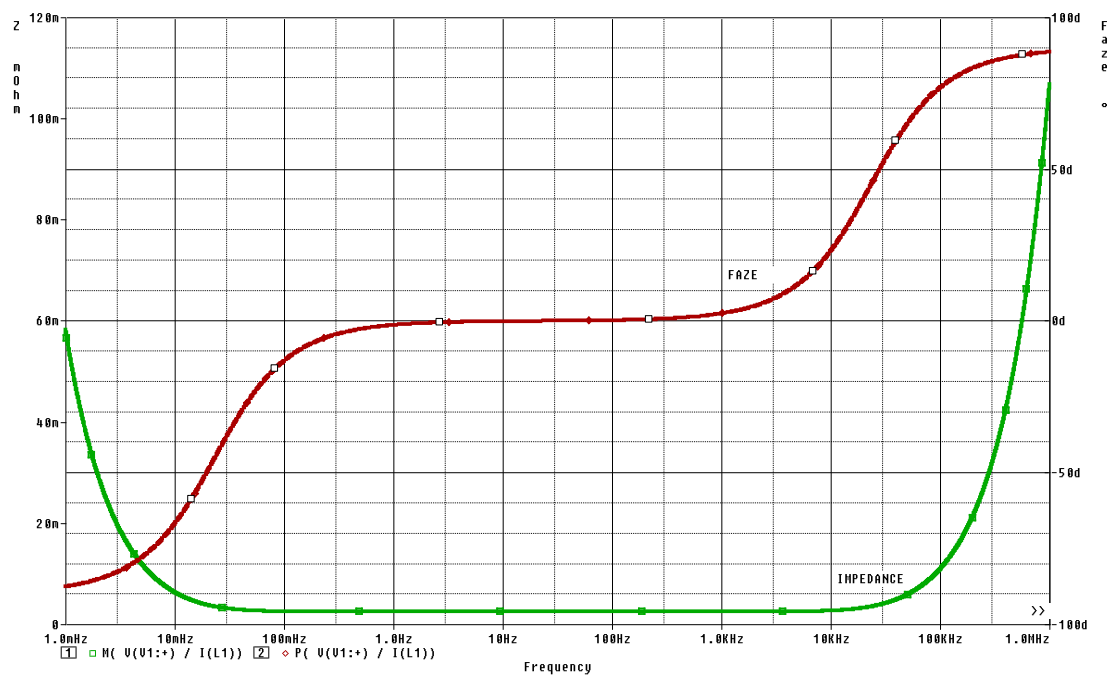
$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (56)$$

pak platí pro naše obvody:

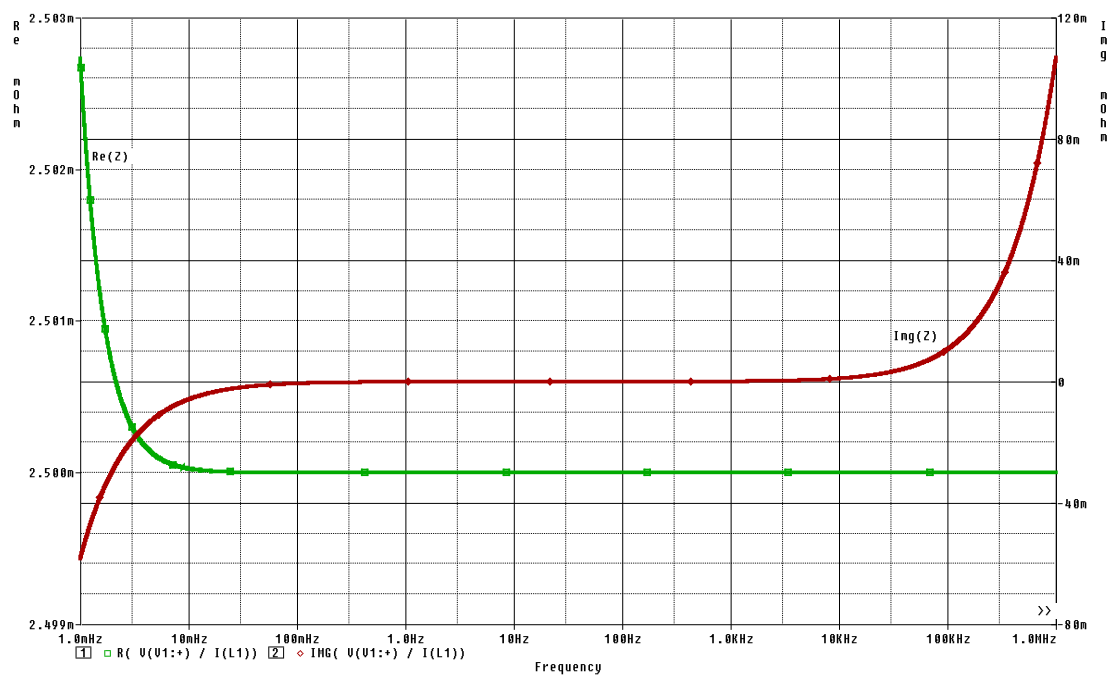
$$f_{RBCAP3000} = \frac{1}{2\pi\sqrt{17 \times 10^{-9} \cdot 2733}} = 23,34 \text{ Hz} \quad (57)$$

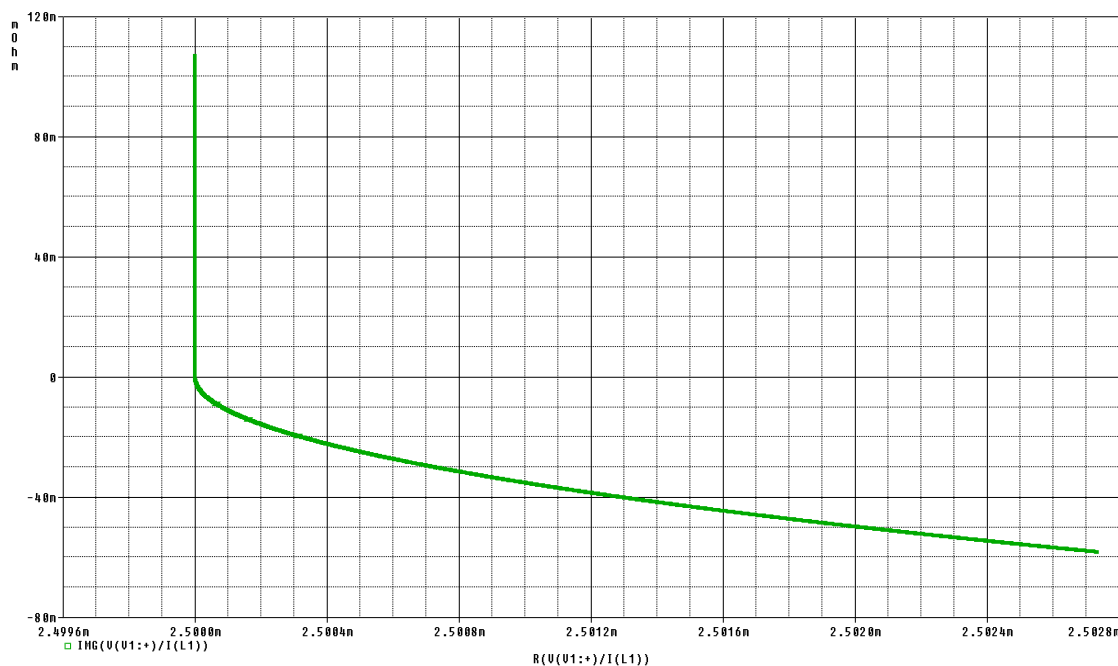
$$f_{RBCAP1200} = \frac{1}{2\pi\sqrt{22 \times 10^{-9} \cdot 1160}} = 31,50 \text{ Hz} \quad (58)$$

$$f_{RBCAP2000} = \frac{1}{2\pi\sqrt{22 \times 10^{-9} \cdot 2000}} = 23,99 \text{ Hz} \quad (59)$$



Obr.19: Průběh impedance a fáze pro BCAP 3000

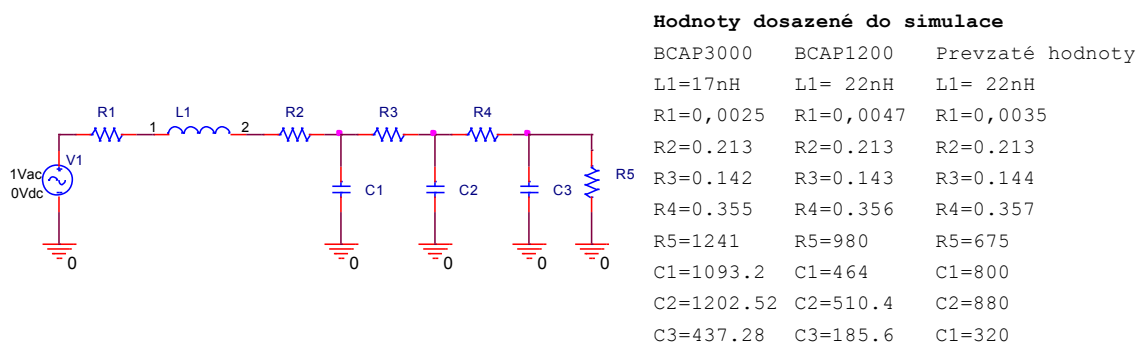
Obr.20: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro BCAP 3000



Obr.21: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro BCAP 3000 v Nyquistově rovině

4.3.2 Žebříkový model

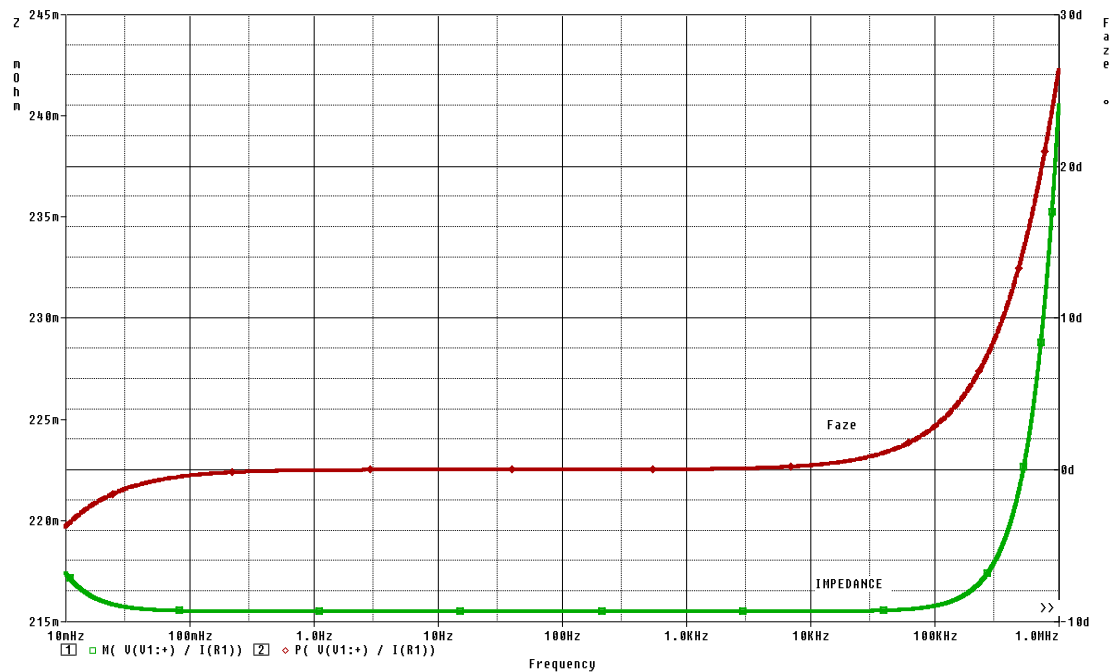
Model na obr. 19 byl využit z toho důvodu, že jej na svých stránkách uvádí Maxwell^R Technologies jako oficiální. Jedná se už o složitější model, a to jak z pohledu typologického uspořádání, tak z pohledu stanovení parametrů obvodu. V současné době jsme schopni stanovit základní parametry, jež jsou uvedeny v tab. č. 7. Zdroj uvádí, že se model hodí právě pro všechny typy simulací. Převzaté hodnoty pochází z literatury [6].



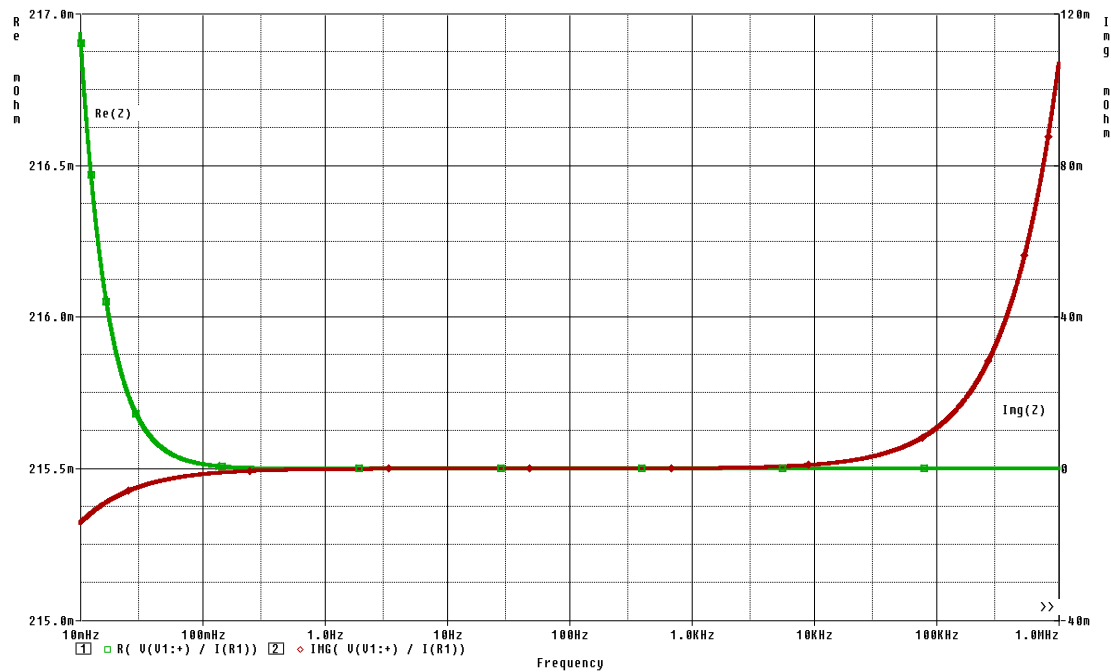
Obr.22: Schéma zapojení žebříkového modelu v OrCAD Capture

Zapojení, které je uvedeno na obr. 22, vychází z principu zapojení, o kterém byla zmínka v kapitole 1 při rozboru náhradních obvodů. Jak lze vidět, obsahuje navíc rezistory $R2, R3, R4$.

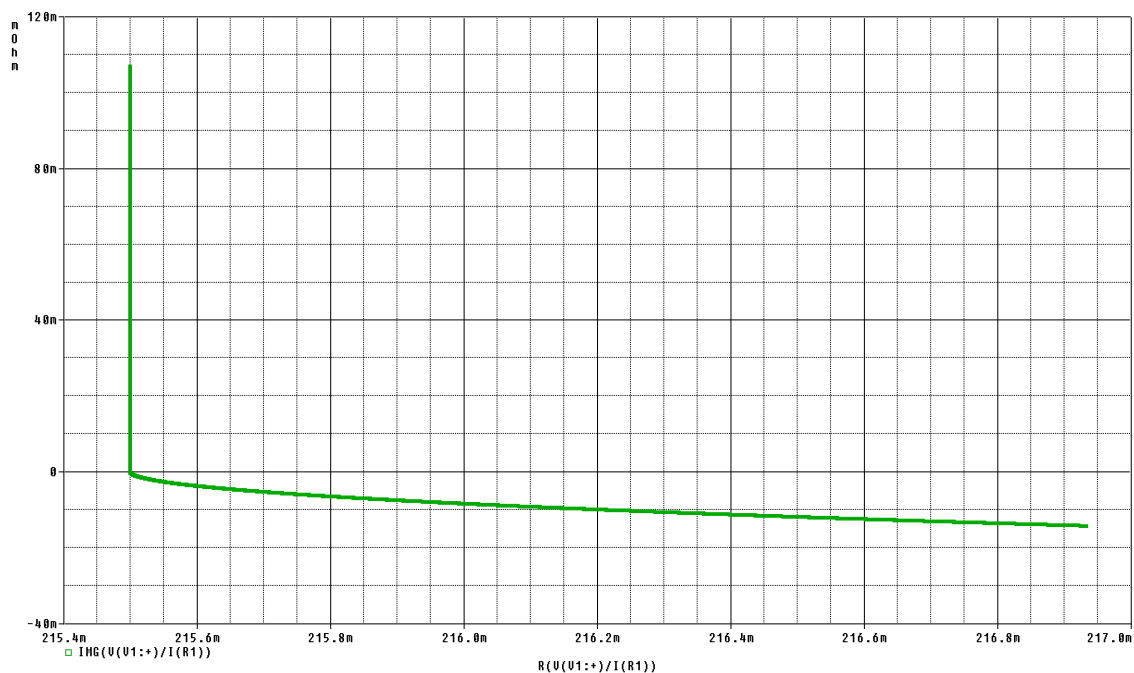
Tyto prvky reprezentují ve schématu vliv elektrolytu, separátorů a dalších vlivů. Jedná se o hodnoty, které jsou těžko určitelné, avšak mohou mít svůj vliv na průběh charakteristik.



Obr.23: Průběh impedance a fáze pro BCAP 3000



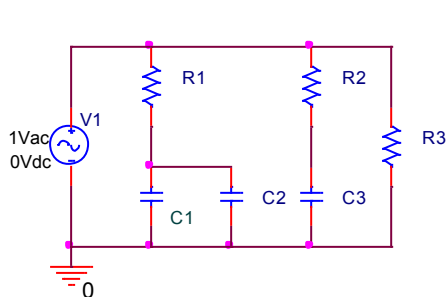
Obr.24: Průběh $Re(Z)$ složky a $Img(Z)$ složky pro BCAP 3000



Obr.25: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro BCAP 3000 v Nyquistově rovině

4.3.3 Model o dvou větvích

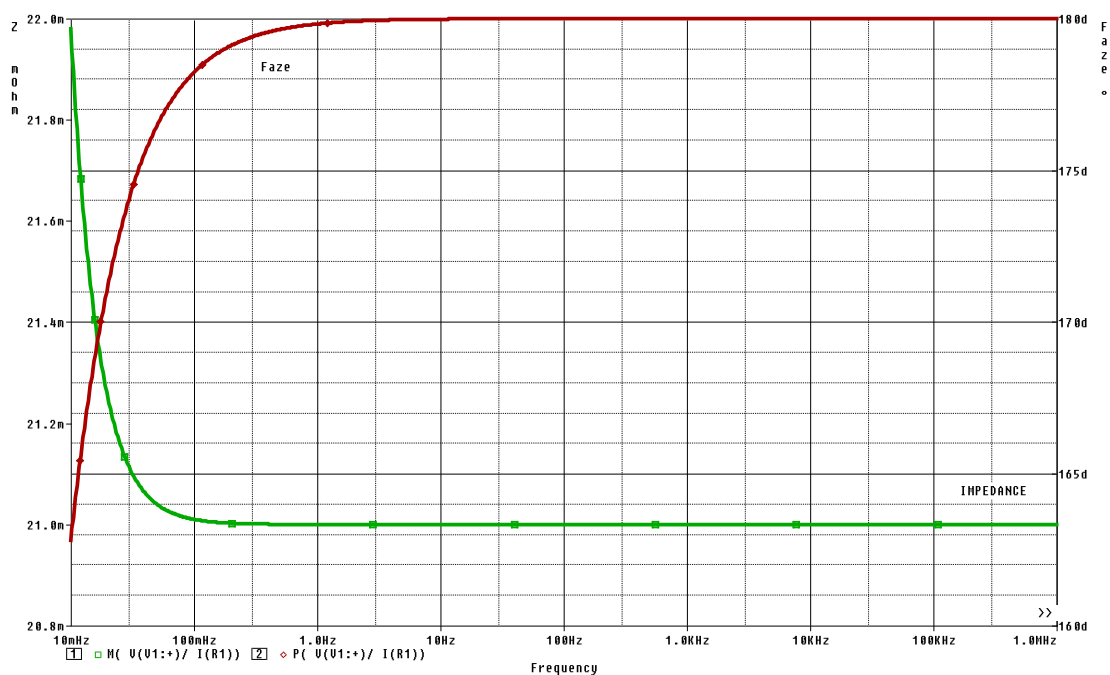
Model, uvedený na obr. 26, je uváděn ve více literárních zdrojích. V porovnání s ostatními modely, které jsou k dispozici, je jednodušší; jednoduchost modelu spočívá právě v malém množství obvodových komponentů a dostatečném teoretickém popisu, který vede k nalezení jejich parametrů. Tento princip je uveden v literatuře [10].



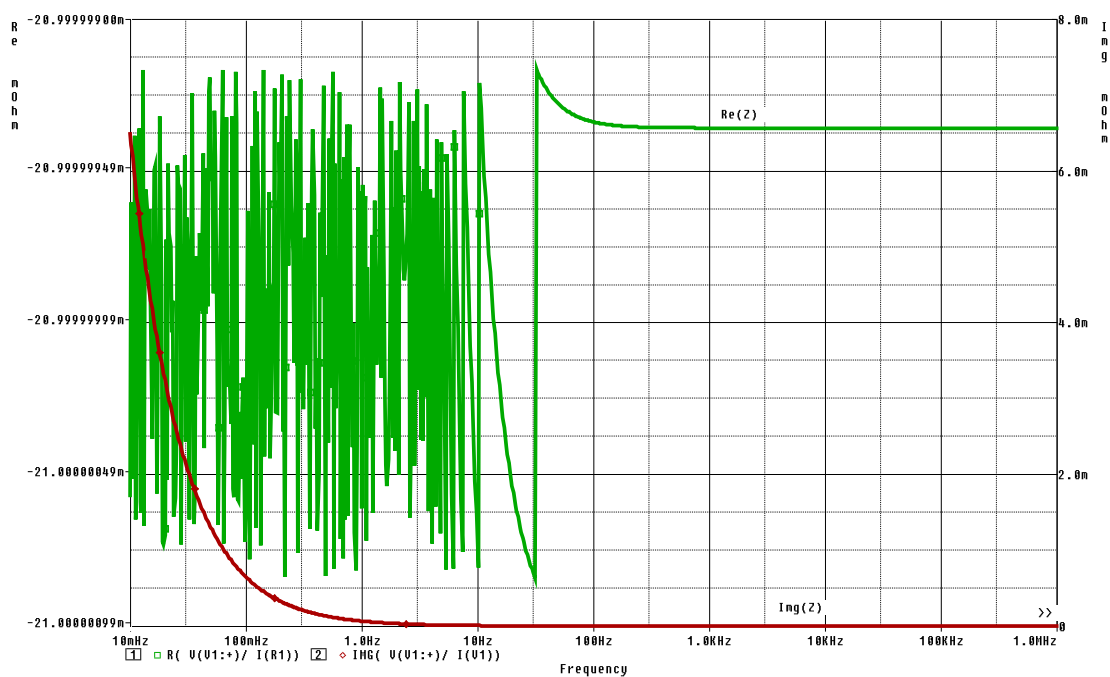
Hodnoty dosazené do simulace

BCAP3000	BCAP1200	Prevzaté hodnoty
R1=0,021	R1=0,059	R1=0,004
R2=39	R2=60	R2=7,8
R3=1241	R3=980	R3=2.500
C1=1626	C1=725	C1=234
C2=826	C2=295	C2=82
C3=215	C3=140	C1=30

Obr.26: Schéma modelu o dvou větvích v OrCAD Capture



Obr.27: Průběh impedance a fáze pro BCAP 3000

Obr.28: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro BCAP 3000



Obr.29: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro BCAP 3000 v Nyquistově rovině

4.4 Vyhodnocení simulací

Při vyhodnocení simulací musíme brát v úvahu celkové zapojení obvodu. Vidíme, že ve schématech figurují i rezistory. Je otázkou, jaký vliv na celkový obvod mají. Budeme-li chtít stanovit rezonanční kmitočet pro celý obvod, který je uveden na obr. 18, použijeme vztah:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{(RC)^2}} \quad (60)$$

pak

$$f_{RBCAP3000} = \frac{\sqrt{21523.428 - 6.63 \cdot 10^{-14}}}{2\pi} = 23.3494 Hz \quad (61)$$

Ze vztahu (61) vidíme, že člen $\frac{1}{(RC)^2}$ je velmi malý, a proto ho můžeme celkově zanedbat.

Můžeme tedy říci, že rezistory mají velmi zanedbatelný vliv na celkový výsledek. Na obr. 19 vidíme průběhy impedance a fáze. Jak vyplynulo se vztahu (56), má mít každý RLC obvod svůj rezonanční kmitočet. Na obr. 19 však nelze z průběhů impedance jasně určit takovýto kmitočet. V tomto případě by se měla rezonance nacházet okolo hodnoty $23 Hz$. Proto je zde uveden také

průběh fáze, který se vidět při nízkých frekvencích pohybuje u hodnoty -90° , při rezonančním kmitočtu se pohybuje fáze okolo 0° a vysoké frekvence jsou charakterizovány hodnotou okolo 90° . Z toho vidíme, že i zde došlo k rezonanci, avšak z průběhu impedance to není příliš patrné. Může to způsobovat velmi nízký činitel jakosti Q . Jedná se o velmi významný faktor. Jestliže se pak podíváme na průběh, zjistíme důležitou skutečnost: navržený obvod vykazuje na rezonančním kmitočtu nejmenší impedanci. Pro ostatní pásma kmitočtů na obě strany od rezonanční frekvence se odpor zvětšuje. Dále můžeme říci, že v nižších kmitočtech se obvod projevuje kapacitním charakterem, naopak při vysokých kmitočtech převládá indukčnost.

Na obr. 20 je uveden průběh reálné a imaginární složky. Jak lze vidět, hodnoty se ustalují právě v rozmezí ve kterém se nachází, vypočtená hodnota rezonance. Obvod se projevuje svým reálným činným odporem. Reálná složka je pak nadále na rozdíl od imaginární složky, která při vysokých frekvencích roste, konstantní. Také zde se ukazuje, že dochází k rezonanci, což dokládá průběh $\text{Im}g(Z)$ složky, která je v době rezonance nulová podle vztahu:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (62)$$

Dále lze říci, že se reálná složka mění vzhledem k imaginární složce ve velmi malém rozmezí hodnot. Průběh reálné a imaginární složky v Nyquistově rovině je uveden na obr. 21. Ukazuje nám vliv parazitní indukčnosti v obvodu. Rozdíl je pak viditelný při porovnání s průběhem na obr. 29, kde právě chybí indukčnost. Na obr. 23 je zobrazen průběh impedance a fáze. Je patrná odlišnost od průběhu na obr. 19. Liší se jak v průběhu fáze, tak impedance. V tomto případě začíná fáze při nízkých frekvencích na hodnotě -4° , pro rezonanci platí pak hodnota fáze 0° a ve vysokých frekvencích stoupá až do hodnoty 26° . To je způsobeno konstrukcí modelu, který je značně složitější.

Obr. 24 je velice podobný průběhu, který je uveden na obr. 20. Liší se pouze hodnotově, což, jak bylo zmíněno dříve, je zapříčiněno složitějším obvodem. Na obr. 27 až 29 můžeme vidět výsledky simulace pro model o dvou větvích. Z uvedených průběhů však vyplývá skutečnost, že model je pro analýzu nevyhovující. Dochází zde k zanedbání indukčnosti přívodů. Proto se model nehodí pro střídavou analýzu. Z průběhu reálné a imaginární složky lze vidět, že dochází k rezonanci v celém rozsahu vyšších frekvencí a nedojde k vyrušení složek právě vlivem chybějící indukčnosti v obvodu.

Závěr

Diplomová práce je rozdělena na dvě části, část teoretickou a část praktickou. Výstupem teoretické části je seznámení se superkapacitorem jako akumulčním prvkem. Je zde uveden základní popis jeho konstrukce, dále se práce zabývá jeho vlastností jako akumulčního prvku.

Výsledkem praktické části je popis měřicí metody, která nás informuje o hodnotových vlastnostech superkapacitoru, jeho skutečné kapacitě, sériovém odporu a svodovém odporu. Tyto hodnoty jsou důležité pro jakoukoliv další práci. Ze zjištěných údajů jsem dále provedl simulace, které měly za úkol prozkoumat impedanční závislosti. Byly použity tři základní modely, z nichž podmínkám vyhověly jen dva.

Superkapacitor jako akumulční prvek nalezne uplatnění v široké oblasti elektrotechniky. Může být použitý jako akumulční prvek v elektronice, např. u blesku pro fotoaparáty. Hlavní využití se ale rýsuje v automobilové technice, kde se právě pro svou schopnost rychlého pojmутí energie jeví jako velice vhodný. Situace vyžadující rychlou reakci jsou při dynamické jízdě v elektromobilech velmi časté.

Práce byla pro mne přínosem. Seznámil jsem se s konstrukcí a vlastnostmi superkapacitoru. Výsledky práce lze považovat za první vstup do problematiky testování akumulčních prvků, kterými superkapacitory určitě jsou.

Seznam použité literatury

- [1] BILL, J., *Superkondenzátory s kapalnými aprotickými elektrolyty*, Brno: VUT, 2008, 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marie Sedlářiková, CSc.
- [2] DUDA, V., *Využití superkapacitorů v trakčních pohonech*, Pardubice: UPa, 2010, 59 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Stanislav Gregorov, CSc.
- [3] KALINA, E., *Aplikace ultrakapacitorů v dopravních systémech*, Brno: VUT, 2008, 64 s. Vedoucí doktorské práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D
- [4] YASSER, D.; PASCAL, V.; HAMID, G.; GERARD, R.; *Electrical, Frequency and Thermal measurement and modelling of Supercapacitor performace*, 3rd European symposium on supercapacitors and applications.,Rome, Italy 2008
- [5] HAMMAR, A.; LALLEMAND, R.; VENET, P.; COQUERY, G.; ROJAT, G.; CHABAS,J.; *Elektrical characterization and modeling of round spiral supercapacitors for high power applications*, European symposium on supercapacitors and applications.,Lausanne , Switzerland 2006
- [6] *Produktové listy firmy Maxwell*. Dostupné na <http://www.maxwell.com>, (přístupné k datu 31.3 2011)
- [7] HROMJÁK, M., *Měnič pro zvyšování napětí palivového článku*, Ostrava: VŠB - TUO, 2009, 58 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.
- [8] DOUGAL, R., A.; GAO, L.; LIU, S.; *Ultracapacitor model with automatic order selection and capacity scaling for dynamic system simulation.*; Journal of Power sources 126 (2004) 250 – 257
- [9] BROUJI, H., El; VINASSA, J. – M.; BRIAT, N.; BERTRAN, N.; WOIRGAED, E.;*Ultracapacitors self discharge modelling using a physical discription of porous electrode impedance.*; IEEE Vehicle power and propulsion conference (VPPC), September3-5, 2008, Harbin, China
- [10] JOHANSSON, P., ANDERSSON, B.; *Comparison of simulation programs for supercapacitor modelling, Model Creation and Verification.*; Chalmers University of Technology., Gothenburg, Sweden, 2008
- [11] FARANDA, R., GALLINA, M.; SON, D.T.; *A new simplified model of Double – Layer Capacitors.*; Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, 20133,Milan,Italy
- [12] MILLER, J., DESHAMDE, U.; RODU, M.; *Ansoft Ansoft first pass Workshop.*; Irvine, CA 2007, USA
- [13] AKULŠIN, P., *Návrh a realizace programovatelné elektronické zátěže*, Ostrava: VŠB - TUO, 2010, 52 s. Vedoucí diplomové práce. Ing. Václav Sládeček, Ph.D.

Seznam příloh

Příloha 1	Tabulka měření nabíjení a vybíjení superkapacitoru 3000F
Příloha 2	Tabulka měření nabíjení a vybíjení superkapacitoru 1200F
Příloha 3	Tabulka hodnot při samovybíjení článku 3000F
Příloha 4	Tabulka hodnot při samovybíjení článku 1200F
Příloha 5	Průběhy simulací pro jednoduchý model
Příloha 6	Průběhy simulací pro žebříkový model
Příloha 7	Průběhy simulací pro model o dvou větvích

Příloha 1. Tabulka měření nabíjení a vybíjení superkapacitoru 3000F

	Čas[s]	U [V]	I[A]		Čas[s]	U [V]	I[A]		Čas [s]	U [V]	I[A]
1	0,1	0,086	0,0404	39	380,0	0,761	0,0401	77	760,0	1,344	0,0407
2	10,0	0,103	0,0402	40	390,0	0,772	0,0402	78	770,0	1,362	0,0406
3	20,0	0,126	0,0403	41	400,0	0,794	0,0401	79	780,0	1,378	0,0407
4	30,0	0,142	0,0402	42	410,0	0,811	0,0403	80	790,0	1,394	0,0406
5	40,1	0,165	0,0401	43	420,0	0,826	0,0404	81	800,0	1,405	0,0407
6	50,0	0,186	0,0400	44	430,0	0,840	0,0403	82	810,0	1,419	0,0406
7	60,0	0,207	0,0401	45	440,0	0,857	0,0403	83	820,0	1,435	0,0408
8	70,0	0,222	0,0400	46	450,0	0,872	0,0404	84	830,0	1,448	0,0407
9	80,0	0,240	0,0400	47	460,0	0,888	0,0404	85	840,0	1,468	0,0408
10	90,0	0,263	0,0400	48	470,0	0,906	0,0404	86	850,0	1,483	0,0408
11	100,0	0,276	0,0399	49	480,0	0,924	0,0403	87	860,0	1,498	0,0406
12	110,0	0,295	0,0398	50	490,0	0,936	0,0403	88	870,0	1,512	0,0407
13	120,0	0,309	0,0400	51	500,0	0,953	0,0405	89	880,0	1,528	0,0407
14	130,0	0,328	0,0400	52	510,0	0,965	0,0406	90	890,0	1,541	0,0406
15	140,0	0,344	0,0400	53	520,0	0,981	0,0405	91	900,0	1,555	0,0406
16	150,0	0,359	0,0397	54	530,0	0,994	0,0404	92	910,0	1,568	0,0408
17	160,0	0,374	0,0399	55	540,0	1,009	0,0405	93	920,0	1,583	0,0407
18	170,0	0,391	0,0397	56	550,0	1,025	0,0404	94	930,0	1,597	0,0406
19	180,0	0,409	0,0396	57	560,0	1,039	0,0406	95	940,0	1,611	0,0407
20	190,0	0,425	0,0396	58	570,0	1,055	0,0405	96	950,0	1,628	0,0407
21	200,0	0,442	0,0396	59	580,0	1,070	0,0406	97	960,0	1,644	0,0407
22	210,0	0,459	0,0396	60	590,0	1,089	0,0406	98	970,0	1,653	0,0408
23	220,0	0,481	0,0395	61	600,0	1,102	0,0404	99	980,0	1,668	0,0406
24	230,0	0,493	0,0396	62	610,0	1,119	0,0405	100	990,0	1,682	0,0407
25	240,0	0,511	0,0395	63	620,0	1,134	0,0406	101	1000,0	1,695	0,0408
26	250,0	0,530	0,0397	64	630,0	1,151	0,0404	102	1010,0	1,708	0,0406
27	260,0	0,555	0,0397	65	640,0	1,164	0,0404	103	1020,0	1,721	0,0406
28	270,0	0,570	0,0399	66	650,0	1,182	0,0406	104	1030,0	1,737	0,0407
29	280,0	0,592	0,0398	67	660,0	1,192	0,0406	105	1040,0	1,753	0,0407
30	290,0	0,613	0,0399	68	670,0	1,213	0,0407	106	1050,0	1,766	0,0407
31	300,0	0,626	0,0399	69	680,0	1,228	0,0406	107	1060,0	1,777	0,0406
32	310,0	0,638	0,0401	70	690,0	1,245	0,0405	108	1070,0	1,787	0,0407
33	320,0	0,663	0,0402	71	700,0	1,261	0,0406	109	1080,0	1,802	0,0408
34	330,0	0,677	0,0401	72	710,0	1,274	0,0406	110	1090,0	1,818	0,0407
35	340,0	0,696	0,0401	73	720,0	1,285	0,0406	111	1100,0	1,832	0,0407
36	350,0	0,714	0,0400	74	730,0	1,301	0,0407	112	1110,0	1,845	0,0407
37	360,0	0,731	0,0402	75	740,0	1,315	0,0407	113	1120,0	1,861	0,0407
38	370,0	0,747	0,0401	76	750,0	1,332	0,0407	114	1130,0	1,875	0,0409

Příloha 1. Tabulka měření nabíjení a vybíjení superkapacitoru 3000F

	Čas [s]	U [V]	I[A]		Čas [s]	U [V]	I[A]		Čas [s]	U [V]	I[A]
115	1140,0	1,888	0,0407	153	1520,0	2,354	0,0236	191	1900,0	2,467	0,0044
116	1150,0	1,903	0,0407	154	1530,0	2,362	0,0224	192	1910,0	2,462	0,0044
117	1160,0	1,915	0,0407	155	1540,0	2,368	0,0216	193	1920,0	2,465	0,0042
118	1170,0	1,932	0,0407	156	1550,0	2,370	0,0205	194	1930,0	2,464	0,0041
119	1180,0	1,943	0,0407	157	1560,0	2,377	0,0194	195	1940,0	2,466	0,0039
120	1190,0	1,957	0,0408	158	1570,0	2,385	0,0186	196	1950,0	2,466	0,0039
121	1200,0	1,971	0,0407	159	1580,0	2,385	0,0176	197	1960,0	2,470	0,0037
122	1210,0	1,982	0,0409	160	1590,0	2,390	0,0170	198	1470,0	2,315	0,0304
123	1220,0	1,995	0,0407	161	1600,0	2,396	0,0159	199	1480,0	2,320	0,0287
124	1230,0	2,011	0,0408	162	1610,0	2,400	0,0151	200	1490,0	2,333	0,0274
125	1240,0	2,024	0,0408	163	1620,0	2,404	0,0145	201	1500,0	2,340	0,0262
126	1250,0	2,035	0,0407	164	1630,0	2,408	0,0139	202	1510,0	2,344	0,0249
127	1260,0	2,050	0,0407	165	1640,0	2,410	0,0131	203	1520,0	2,354	0,0236
128	1270,0	2,063	0,0408	166	1650,0	2,417	0,0126	204	1530,0	2,362	0,0224
129	1280,0	2,073	0,0408	167	1660,0	2,418	0,0118	205	1540,0	2,368	0,0216
130	1290,0	2,088	0,0407	168	1670,0	2,420	0,0113	206	1550,0	2,370	0,0205
131	1300,0	2,103	0,0408	169	1680,0	2,426	0,0108	207	1560,0	2,377	0,0194
132	1310,0	2,113	0,0408	170	1690,0	2,422	0,0102	208	1570,0	2,385	0,0186
133	1320,0	2,124	0,0408	171	1700,0	2,428	0,0097	209	1580,0	2,385	0,0176
134	1330,0	2,139	0,0407	172	1710,0	2,431	0,0094	210	1590,0	2,390	0,0170
135	1340,0	2,152	0,0409	173	1720,0	2,431	0,0091	211	1600,0	2,396	0,0159
136	1350,0	2,160	0,0408	174	1730,0	2,438	0,0086	212	1610,0	2,400	0,0151
137	1360,0	2,173	0,0408	175	1740,0	2,439	0,0083	213	1620,0	2,404	0,0145
138	1370,0	2,191	0,0407	176	1750,0	2,441	0,0079	214	1630,0	2,408	0,0139
139	1380,0	2,208	0,0408	177	1760,0	2,444	0,0076	215	1640,0	2,410	0,0131
140	1390,0	2,219	0,0407	178	1770,0	2,449	0,0072	216	1650,0	2,417	0,0126
141	1400,0	2,231	0,0407	179	1780,0	2,444	0,0072	217	1660,0	2,418	0,0118
142	1410,0	2,248	0,0408	180	1790,0	2,449	0,0067	218	1670,0	2,420	0,0113
143	1420,0	2,265	0,0393	181	1800,0	2,447	0,0066	219	1680,0	2,426	0,0108
144	1430,0	2,274	0,0372	182	1810,0	2,452	0,0062	220	1690,0	2,422	0,0102
145	1440,0	2,285	0,0354	183	1820,0	2,450	0,0061	221	1700,0	2,428	0,0097
146	1450,0	2,294	0,0335	184	1830,0	2,452	0,0057	222	1710,0	2,431	0,0094
147	1460,0	2,305	0,0318	185	1840,0	2,457	0,0057	223	1720,0	2,431	0,0091
148	1470,0	2,315	0,0304	186	1850,0	2,457	0,0054	224	1730,0	2,438	0,0086
149	1480,0	2,320	0,0287	187	1860,0	2,457	0,0051	225	1740,0	2,439	0,0083
150	1490,0	2,333	0,0274	188	1870,0	2,460	0,0050	226	1750,0	2,441	0,0079
151	1500,0	2,340	0,0262	189	1880,0	2,460	0,0049	227	1760,0	2,444	0,0076
152	1510,0	2,344	0,0249	190	1890,0	2,461	0,0045	228	1770,0	2,449	0,0072

Příloha 1. Tabulka měření nabíjení a vybíjení superkapacitoru 3000F

	Čas [s]	U [V]	I[A]		Čas [s]	U [V]	I[A]		Čas [s]	U [V]	I[A]
229	1780,0	2,444	0,0072	267	2160,0	2,482	0,0022	305	2540,0	2,485	0,0013
230	1790,0	2,449	0,0067	268	2170,0	2,477	0,0023	306	2550,0	2,485	0,0015
231	1800,0	2,447	0,0066	269	2180,0	2,480	0,0021	307	2560,0	2,486	0,0013
232	1810,0	2,452	0,0062	270	2190,0	2,479	0,0021	308	2570,0	2,486	0,0012
233	1820,0	2,450	0,0061	271	2200,0	2,480	0,0020	309	2580,0	2,476	-0,0402
234	1830,0	2,452	0,0057	272	2210,0	2,481	0,0020	310	2590,0	2,463	-0,0401
235	1840,0	2,457	0,0057	273	2220,0	2,479	0,0020	311	2600,0	2,451	-0,0400
236	1850,0	2,457	0,0054	274	2230,0	2,481	0,0019	312	2610,0	2,441	-0,0401
237	1860,0	2,457	0,0051	275	2240,0	2,480	0,0019	313	2620,0	2,426	-0,0399
238	1870,0	2,460	0,0050	276	2250,0	2,482	0,0018	314	2630,0	2,414	-0,0400
239	1880,0	2,460	0,0049	277	2260,0	2,482	0,0020	315	2640,0	2,405	-0,0400
240	1890,0	2,461	0,0045	278	2270,0	2,483	0,0019	316	2650,0	2,394	-0,0399
241	1900,0	2,467	0,0044	279	2280,0	2,485	0,0017	317	2660,0	2,377	-0,0399
242	1910,0	2,462	0,0044	280	2290,0	2,482	0,0017	318	2670,0	2,368	-0,0398
243	1920,0	2,465	0,0042	281	2300,0	2,480	0,0017	319	2680,0	2,357	-0,0399
244	1930,0	2,464	0,0041	282	2310,0	2,484	0,0017	320	2690,0	2,337	-0,0398
245	1940,0	2,466	0,0039	283	2320,0	2,483	0,0016	321	2700,0	2,328	-0,0399
246	1950,0	2,466	0,0039	284	2330,0	2,483	0,0017	322	2710,0	2,313	-0,0398
247	1960,0	2,470	0,0037	285	2340,0	2,481	0,0017	323	2720,0	2,302	-0,0398
248	1970,0	2,468	0,0036	286	2350,0	2,484	0,0016	324	2730,0	2,290	-0,0398
249	1980,0	2,468	0,0036	287	2360,0	2,483	0,0016	325	2740,0	2,277	-0,0398
250	1990,0	2,472	0,0034	288	2370,0	2,483	0,0015	326	2750,0	2,258	-0,0397
251	2000,0	2,472	0,0034	289	2380,0	2,487	0,0014	327	2760,0	2,246	-0,0396
252	2010,0	2,474	0,0032	290	2390,0	2,484	0,0015	328	2770,0	2,232	-0,0397
253	2020,0	2,473	0,0030	291	2400,0	2,483	0,0015	329	2780,0	2,221	-0,0397
254	2030,0	2,474	0,0029	292	2410,0	2,483	0,0015	330	2790,0	2,202	-0,0396
255	2040,0	2,474	0,0028	293	2420,0	2,482	0,0014	331	2800,0	2,188	-0,0395
256	2050,0	2,474	0,0027	294	2430,0	2,487	0,0014	332	2810,0	2,177	-0,0396
257	2060,0	2,472	0,0028	295	2440,0	2,486	0,0014	333	2820,0	2,164	-0,0396
258	2070,0	2,475	0,0027	296	2450,0	2,486	0,0014	334	2830,0	2,151	-0,0395
259	2080,0	2,477	0,0024	297	2460,0	2,484	0,0014	335	2840,0	2,137	-0,0395
260	2090,0	2,469	0,0025	298	2470,0	2,486	0,0014	336	2850,0	2,124	-0,0394
261	2100,0	2,477	0,0025	299	2480,0	2,487	0,0013	337	2860,0	2,113	-0,0392
262	2110,0	2,477	0,0025	300	2490,0	2,485	0,0013	338	2870,0	2,099	-0,0394
263	2120,0	2,476	0,0025	301	2500,0	2,489	0,0013	339	2880,0	2,086	-0,0395
264	2130,0	2,477	0,0024	302	2510,0	2,484	0,0013	340	2890,0	2,077	-0,0393
265	2140,0	2,481	0,0022	303	2520,0	2,487	0,0015	341	2900,0	2,060	-0,0394
266	2150,0	2,479	0,0022	304	2530,0	2,487	0,0013	342	2910,0	2,049	-0,0394

Příloha 1. Tabulka měření nabíjení a vybíjení superkapacitoru 3000F

	Čas [s]	U [V]	I[A]		Čas [s]	U [V]	I[A]		Čas [s]	U [V]	I[A]
343	2920,0	2,034	-0,0395	381	3300,0	1,522	-0,039	419	3680,0	0,966	-0,0393
344	2930,0	2,021	-0,0395	382	3310,0	1,506	-0,039	420	3690,0	0,947	-0,0393
345	2940,0	2,010	-0,0396	383	3320,0	1,490	-0,039	421	3700,0	0,930	-0,0394
346	2950,0	1,995	-0,0396	384	3330,0	1,476	-0,039	422	3710,0	0,913	-0,0394
347	2960,0	1,987	-0,0395	385	3340,0	1,463	-0,039	423	3720,0	0,902	-0,0392
348	2970,0	1,970	-0,0395	386	3350,0	1,446	-0,039	424	3730,0	0,893	-0,0393
349	2980,0	1,956	-0,0395	387	3360,0	1,428	-0,039	425	3740,0	0,873	-0,0393
350	2990,0	1,941	-0,0395	388	3370,0	1,416	-0,039	426	3750,0	0,858	-0,0393
351	3000,0	1,928	-0,0394	389	3380,0	1,397	-0,039	427	3760,0	0,844	-0,0393
352	3010,0	1,914	-0,0394	390	3390,0	1,389	-0,039	428	3770,0	0,829	-0,0393
353	3020,0	1,902	-0,0395	391	3400,0	1,375	-0,039	429	3780,0	0,810	-0,0393
354	3030,0	1,891	-0,0393	392	3410,0	1,357	-0,039	430	3790,0	0,794	-0,0393
355	3040,0	1,873	-0,0393	393	3420,0	1,344	-0,039	431	3800,0	0,777	-0,0393
356	3050,0	1,864	-0,0394	394	3430,0	1,330	-0,039	432	3810,0	0,763	-0,0394
357	3060,0	1,849	-0,0394	395	3440,0	1,317	-0,040	433	3820,0	0,750	-0,0393
358	3070,0	1,832	-0,0394	396	3450,0	1,304	-0,039	434	3830,0	0,733	-0,0392
359	3080,0	1,822	-0,0395	397	3460,0	1,288	-0,039	435	3840,0	0,717	-0,0393
360	3090,0	1,807	-0,0395	398	3470,0	1,272	-0,039	436	3850,0	0,701	-0,0393
361	3100,0	1,791	-0,0395	399	3480,0	1,262	-0,039	437	3860,0	0,686	-0,0392
362	3110,0	1,776	-0,0395	400	3490,0	1,247	-0,039	438	3870,0	0,672	-0,0393
363	3120,0	1,766	-0,0394	401	3500,0	1,231	-0,039	439	3880,0	0,652	-0,0392
364	3130,0	1,756	-0,0394	402	3510,0	1,217	-0,039	440	3890,0	0,636	-0,0393
365	3140,0	1,741	-0,0394	403	3520,0	1,202	-0,039	441	3900,0	0,617	-0,0392
366	3150,0	1,728	-0,0395	404	3530,0	1,183	-0,039	442	3910,0	0,599	-0,0392
367	3160,0	1,711	-0,0395	405	3540,0	1,168	-0,039	443	3920,0	0,580	-0,0392
368	3170,0	1,699	-0,0394	406	3550,0	1,154	-0,039	444	3930,0	0,564	-0,0394
369	3180,0	1,685	-0,0394	407	3560,0	1,138	-0,039	445	3940,0	0,542	-0,0393
370	3190,0	1,673	-0,0393	408	3570,0	1,124	-0,039	446	3950,0	0,528	-0,0393
371	3200,0	1,659	-0,0393	409	3580,0	1,110	-0,039	447	3960,0	0,508	-0,0394
372	3210,0	1,646	-0,0394	410	3590,0	1,098	-0,039	448	3970,0	0,492	-0,0394
373	3220,0	1,631	-0,0395	411	3600,0	1,081	-0,039	449	3980,0	0,477	-0,0392
374	3230,0	1,620	-0,0394	412	3610,0	1,066	-0,039	450	3990,0	0,458	-0,0394
375	3240,0	1,603	-0,0393	413	3620,0	1,051	-0,039	451	4000,0	0,441	-0,0393
376	3250,0	1,593	-0,0396	414	3630,0	1,031	-0,039	452	4010,0	0,424	-0,0393
377	3260,0	1,577	-0,0392	415	3640,0	1,017	-0,039	453	4020,0	0,410	-0,0392
378	3270,0	1,560	-0,0394	416	3650,0	1,005	-0,039	454	4030,0	0,390	-0,0394
379	3280,0	1,548	-0,0392	417	3660,0	0,988	-0,039	455	4040,0	0,376	-0,0392

Příloha 1. Tabulka měření nabíjení a vybíjení superkapacitoru 3000F

	Čas [s]	U [V]	I[A]		Čas [s]	U [V]	I[A]		Čas [s]	U [V]	I[A]
380	3290,0	1,533	-0,0394	418	3670,0	0,979	-0,039	456	4050,0	0,361	-0,0393
457	4060,0	0,347	-0,0392	472	4210,0	0,090	-0,0392	487	4360,0	0,084	0,0002
458	4070,0	0,336	-0,0393	473	4220,0	0,083	0,0004	488	4370,0	0,087	0,0003
459	4080,0	0,314	-0,0392	474	4230,0	0,085	0,0003	489	4380,0	0,086	0,0004
460	4090,0	0,300	-0,0392	475	4240,0	0,084	0,0003	490	4390,0	0,089	0,0002
461	4100,0	0,286	-0,0391	476	4250,0	0,083	0,0003	491	4400,0	0,087	0,0004
462	4110,0	0,266	-0,0392	477	4260,0	0,084	0,0002	492	4410,0	0,088	0,0003
463	4120,0	0,254	-0,0392	478	4270,0	0,084	0,0003	493	4420,0	0,086	0,0003
464	4130,0	0,237	-0,0393	479	4280,0	0,085	0,0003	494	4430,0	0,087	0,0004
465	4140,0	0,219	-0,0392	480	4290,0	0,084	0,0004	495	4440,0	0,088	0,0004
466	4150,0	0,199	-0,0392	481	4300,0	0,085	0,0004	496	4450,0	0,088	0,0002
467	4160,0	0,179	-0,0393	482	4310,0	0,085	0,0003	497	4460,0	0,090	0,0004
468	4170,0	0,159	-0,0393	483	4320,0	0,082	0,0004	498	4470,0	0,090	0,0003
469	4180,0	0,140	-0,0393	484	4330,0	0,086	0,0003	499	4480,0	0,091	0,0003
470	4190,0	0,121	-0,0393	485	4340,0	0,086	0,0003	500	4490,0	0,089	0,0002
471	4200,0	0,102	-0,0393	486	4350,0	0,086	0,0004	501	4500,0	0,093	0,0003

Příloha 2. Tabulka měření nabíjení a vybíjení superkapacitoru 1200F

	Čas[s]	U[V]	I[A]		Čas[s]	U[V]	I[A]		Čas[s]	U[V]	I[A]
1	0,1	0,24	0,040	39	380,0	1,58	0,039	77	760,0	2,45	0,009
2	10,0	0,28	0,040	40	390,0	1,60	0,039	78	770,0	2,45	0,008
3	20,0	0,32	0,040	41	400,0	1,63	0,039	79	780,0	2,46	0,008
4	30,0	0,36	0,040	42	410,0	1,66	0,040	80	790,0	2,46	0,007
5	40,0	0,39	0,040	43	420,0	1,70	0,039	81	800,0	2,46	0,006
6	50,0	0,44	0,040	44	430,0	1,73	0,039	82	810,0	2,47	0,006
7	60,0	0,47	0,040	45	440,0	1,75	0,040	83	820,0	2,47	0,006
8	70,0	0,51	0,040	46	450,0	1,78	0,040	84	830,0	2,47	0,005
9	80,0	0,55	0,040	47	460,0	1,81	0,040	85	840,0	2,47	0,005
10	90,0	0,60	0,040	48	470,0	1,84	0,040	86	850,0	2,47	0,004
11	100,0	0,64	0,040	49	480,0	1,87	0,040	87	860,0	2,48	0,004
12	110,0	0,68	0,040	50	490,0	1,90	0,040	88	870,0	2,48	0,004
13	120,0	0,72	0,040	51	500,0	1,93	0,040	89	880,0	2,48	0,004
14	130,0	0,75	0,040	52	510,0	1,96	0,040	90	890,0	2,48	0,004
15	140,0	0,79	0,040	53	520,0	1,99	0,040	91	900,0	2,48	0,004
16	150,0	0,83	0,040	54	530,0	2,02	0,040	92	910,0	2,48	0,003
17	160,0	0,86	0,040	55	540,0	2,04	0,040	93	920,0	2,48	0,003
18	170,0	0,90	0,039	56	550,0	2,07	0,040	94	930,0	2,48	0,003
19	180,0	0,93	0,039	57	560,0	2,10	0,040	95	940,0	2,48	0,003
20	190,0	0,96	0,039	58	570,0	2,13	0,040	96	950,0	2,48	0,003
21	200,0	1,00	0,040	59	580,0	2,15	0,040	97	960,0	2,49	0,003
22	210,0	1,02	0,039	60	590,0	2,18	0,040	98	970,0	2,47	-0,039
23	220,0	1,06	0,039	61	600,0	2,22	0,040	99	980,0	2,44	-0,039
24	230,0	1,09	0,040	62	610,0	2,24	0,040	100	990,0	2,41	-0,039
25	240,0	1,13	0,039	63	620,0	2,28	0,039	101	1000,0	2,38	-0,039
26	250,0	1,16	0,039	64	630,0	2,30	0,038	102	1010,0	2,35	-0,039
27	260,0	1,20	0,039	65	640,0	2,32	0,034	103	1020,0	2,32	-0,039
28	270,0	1,23	0,039	66	650,0	2,34	0,030	104	1030,0	2,29	-0,039
29	280,0	1,26	0,039	67	660,0	2,36	0,027	105	1040,0	2,26	-0,039
30	290,0	1,29	0,039	68	670,0	2,38	0,024	106	1050,0	2,22	-0,039
31	300,0	1,32	0,040	69	680,0	2,39	0,021	107	1060,0	2,19	-0,038
32	310,0	1,35	0,039	70	690,0	2,40	0,019	108	1070,0	2,16	-0,038
33	320,0	1,38	0,039	71	700,0	2,41	0,017	109	1080,0	2,13	-0,038
34	330,0	1,41	0,039	72	710,0	2,42	0,015	110	1090,0	2,10	-0,038
35	340,0	1,45	0,039	73	720,0	2,43	0,013	111	1100,0	2,07	-0,038
36	350,0	1,48	0,040	74	730,0	2,43	0,012	112	1110,0	2,04	-0,038
37	360,0	1,51	0,039	75	740,0	2,44	0,011	113	1120,0	2,01	-0,038
38	370,0	1,54	0,039	76	750,0	2,45	0,010	114	1130,0	1,98	-0,038

Příloha 2. Tabulka měření nabíjení a vybíjení superkapacitoru 1200F

	Čas[s]	U[V]	I[A]		Čas[s]	U[V]	I[A]		Čas[s]	U[V]	I[A]
115	1140,0	1,95	-0,038	138	1370,0	1,23	-0,038	161	1600,0	0,42	-0,038
116	1150,0	1,92	-0,038	139	1380,0	1,20	-0,038	162	1610,0	0,38	-0,038
117	1160,0	1,88	-0,038	140	1390,0	1,17	-0,038	163	1620,0	0,35	-0,038
118	1170,0	1,85	-0,038	141	1400,0	1,13	-0,038	164	1630,0	0,32	-0,038
119	1180,0	1,82	-0,038	142	1410,0	1,10	-0,038	165	1640,0	0,28	-0,038
120	1190,0	1,80	-0,038	143	1420,0	1,07	-0,038	166	1650,0	0,25	-0,038
121	1200,0	1,77	-0,038	144	1430,0	1,03	-0,038	167	1660,0	0,21	-0,038
122	1210,0	1,73	-0,038	145	1440,0	1,00	-0,038	168	1670,0	0,20	0,001
123	1220,0	1,71	-0,038	146	1450,0	0,97	-0,038	169	1680,0	0,20	0,001
124	1230,0	1,67	-0,038	147	1460,0	0,94	-0,038	170	1690,0	0,20	0,001
125	1240,0	1,65	-0,038	148	1470,0	0,90	-0,038	171	1700,0	0,20	0,001
126	1250,0	1,62	-0,038	149	1480,0	0,87	-0,038	172	1710,0	0,20	0,001
127	1260,0	1,59	-0,038	150	1490,0	0,84	-0,038	173	1720,0	0,20	0,001
128	1270,0	1,55	-0,038	151	1500,0	0,80	-0,038	174	1730,0	0,20	0,001
129	1280,0	1,52	-0,038	152	1510,0	0,77	-0,038	175	1740,0	0,20	0,001
130	1290,0	1,49	-0,038	153	1520,0	0,73	-0,038	176	1750,0	0,20	0,001
131	1300,0	1,46	-0,038	154	1530,0	0,70	-0,038	177	1760,0	0,21	0,001
132	1310,0	1,42	-0,038	155	1540,0	0,66	-0,038	178	1770,0	0,20	0,001
133	1320,0	1,39	-0,038	156	1550,0	0,62	-0,038	179	1780,0	0,20	0,001
134	1330,0	1,36	-0,038	157	1560,0	0,58	-0,038	180	1790,0	0,21	0,001
135	1340,0	1,33	-0,038	158	1570,0	0,54	-0,038	181	1800,0	0,20	0,001
136	1350,0	1,30	-0,038	159	1580,0	0,50	-0,038				
137	1360,0	1,27	-0,038	160	1590,0	0,46	-0,038				

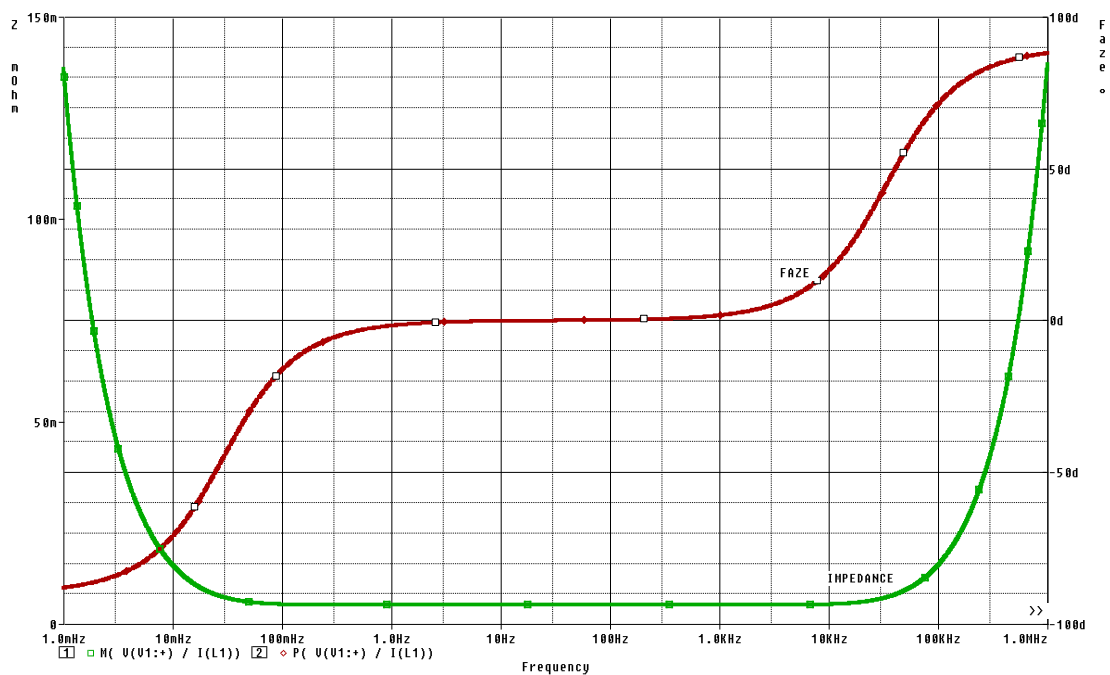
Příloha 3. Tabulka hodnot při samovybíjení článku 3000F

	Čas odpojení zdroje			Napětí článku
[hod]	[min]	[min]	[s]	[V]
0	0	0	0	2,488
0	15	15	900	2,441
0	30	30	1800	2,424
0	45	45	2700	2,413
1	0	60	3600	2,405
1	15	75	4500	2,398
1	30	90	5400	2,393
1	45	105	6300	2,388
2	0	120	7200	2,384
2	15	135	8100	2,38
2	30	150	9000	2,376
2	45	165	9900	2,373
3	0	180	10800	2,37
3	15	195	11700	2,367
3	30	210	12600	2,364
3	45	225	13500	2,362
4	0	240	14400	2,36
4	15	255	15300	2,353
4	30	270	16200	2,358
4	45	285	17100	2,356
5	0	300	18000	2,354
5	15	315	18900	2,352
5	30	330	19800	2,35
5	45	345	20700	2,348
6	0	360	21600	2,347
6	15	375	22500	2,345
6	30	390	23400	2,343
6	45	405	24300	2,342
7	0	420	25200	2,341

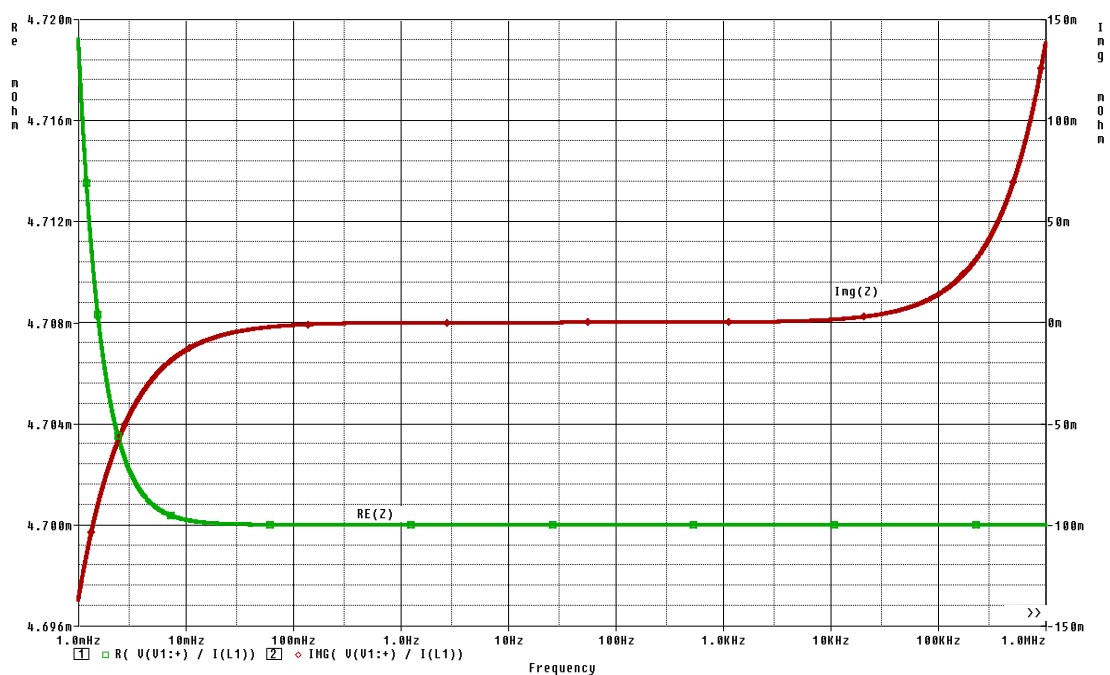
Příloha 4. Tabulka hodnot při samovybíjení článku 1200F

	Čas odpojení zdroje			Napětí článku
[hod]	[min]	[min]	[s]	[V]
0	0	0	0	2,478
0	15	15	900	2,455
0	30	30	1800	2,437
0	45	45	2700	2,424
1	0	60	3600	2,415
1	15	75	4500	2,407
1	30	90	5400	2,4
1	45	105	6300	2,395
2	0	120	7200	2,389
2	15	135	8100	2,385
2	30	150	9000	2,38
2	45	165	9900	2,376
3	0	180	10800	2,373
3	15	195	11700	2,369
3	30	210	12600	2,366
3	45	225	13500	2,363
4	0	240	14400	2,36
4	15	255	15300	2,357
4	30	270	16200	2,355
4	45	285	17100	2,35
5	0	300	18000	2,348
5	15	315	18900	2,346
5	30	330	19800	2,344
5	45	345	20700	2,342
6	0	360	21600	2,34
6	15	375	22500	2,338
6	30	390	23400	2,336
6	45	405	24300	2,334
7	0	420	25200	2,332

Příloha 5. Průběhy simulací pro jednoduchý model

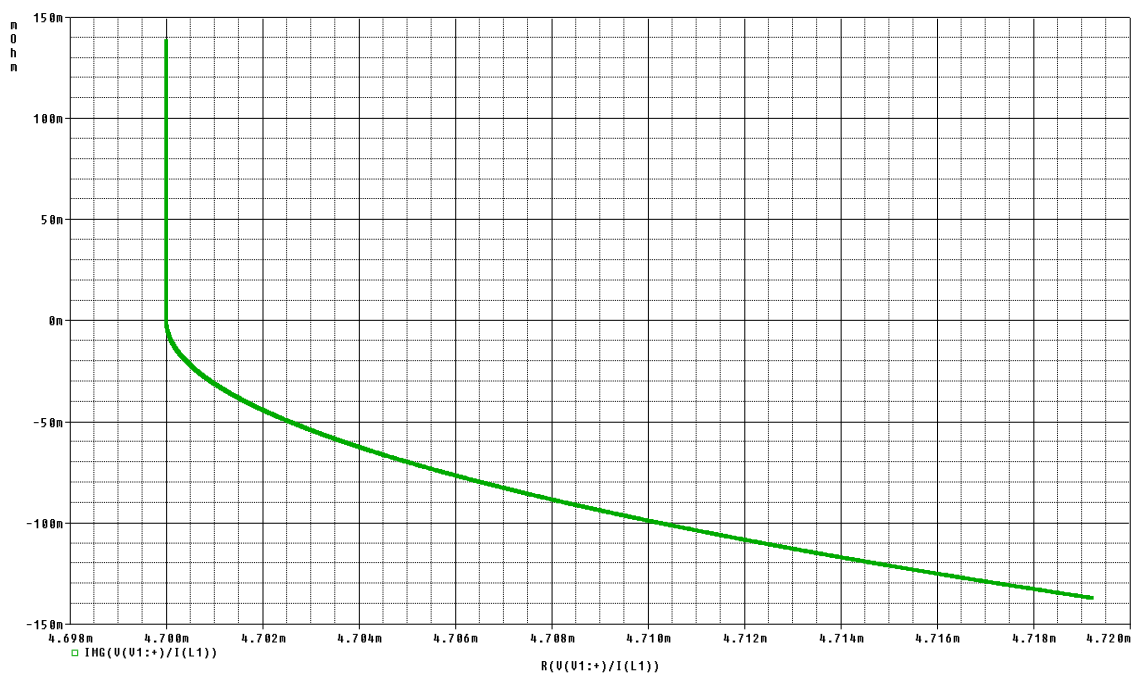


Obr.30: Průběh impedance a fáze pro BCAP 1200

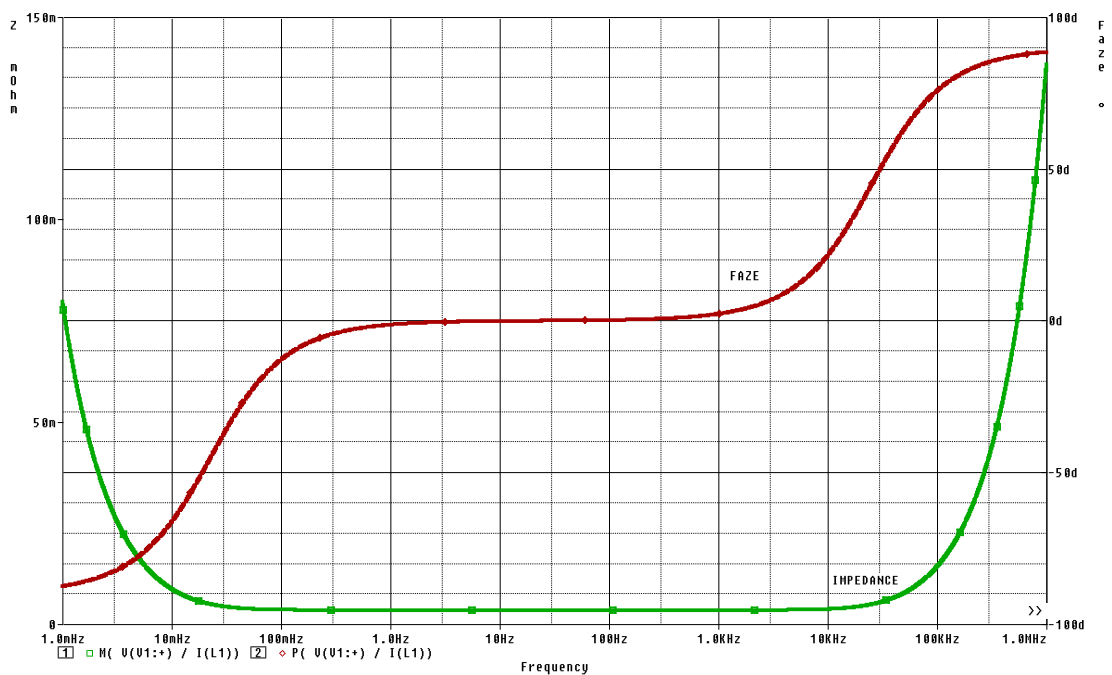


Obr.31: Průběh $Re(Z)$ složky a $Img(Z)$ složky pro BCAP 1200

Příloha 5. Průběhy simulací pro jednoduchý model

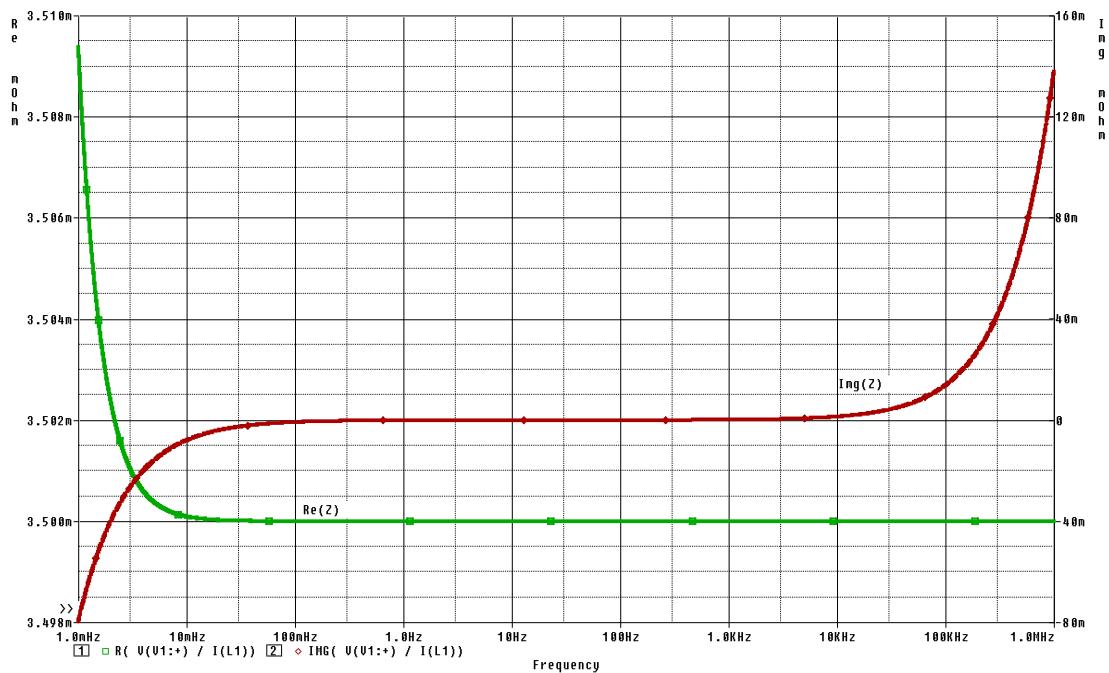


Obr.32: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro BCAP 1200 v Nyquistově rovině

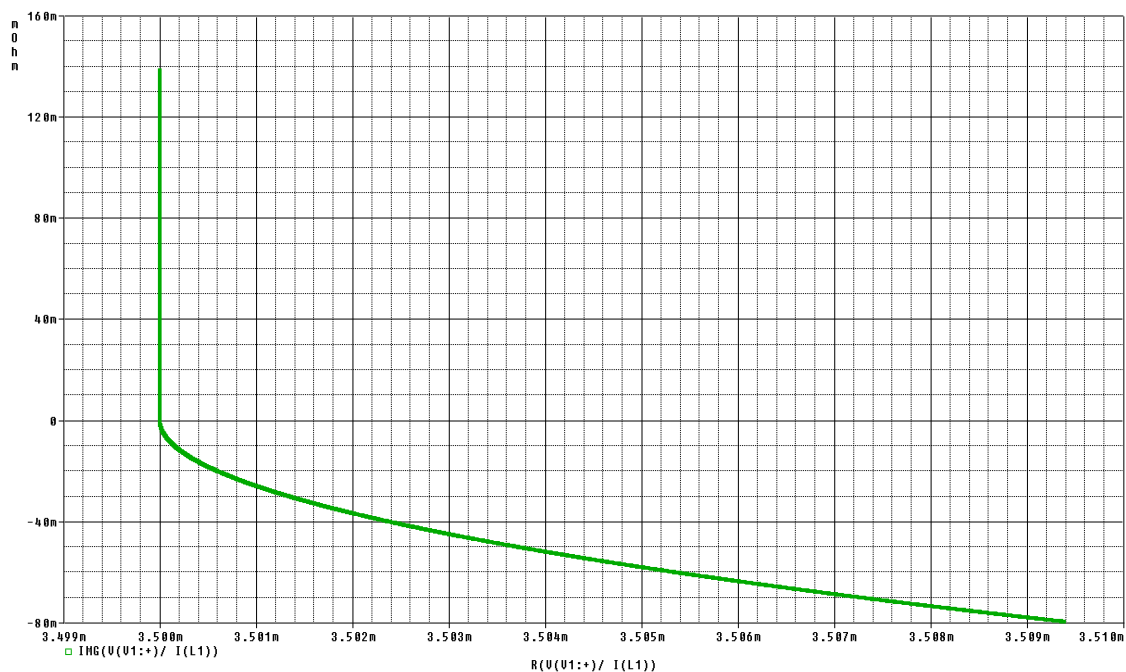


Obr.33: Průběh impedance a fáze pro BCAP 2000

Příloha 5. Průběhy simulací pro jednoduchý model

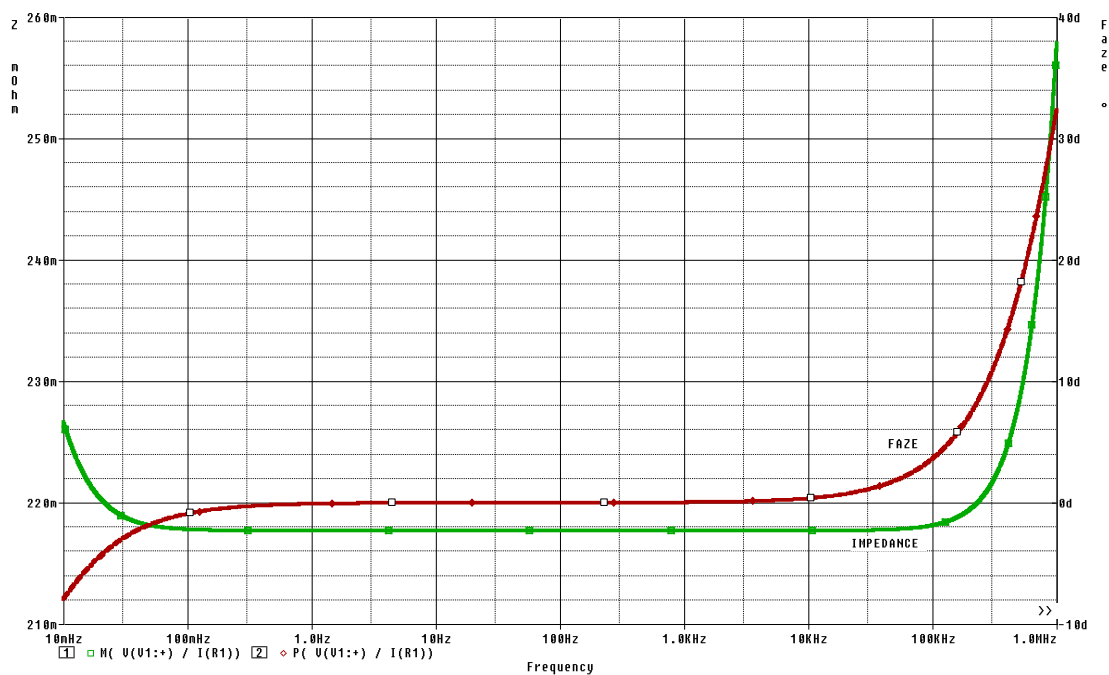


Obr.34: Průběh $Re(Z)$ složky a $Img(Z)$ složky pro BCAP 2000

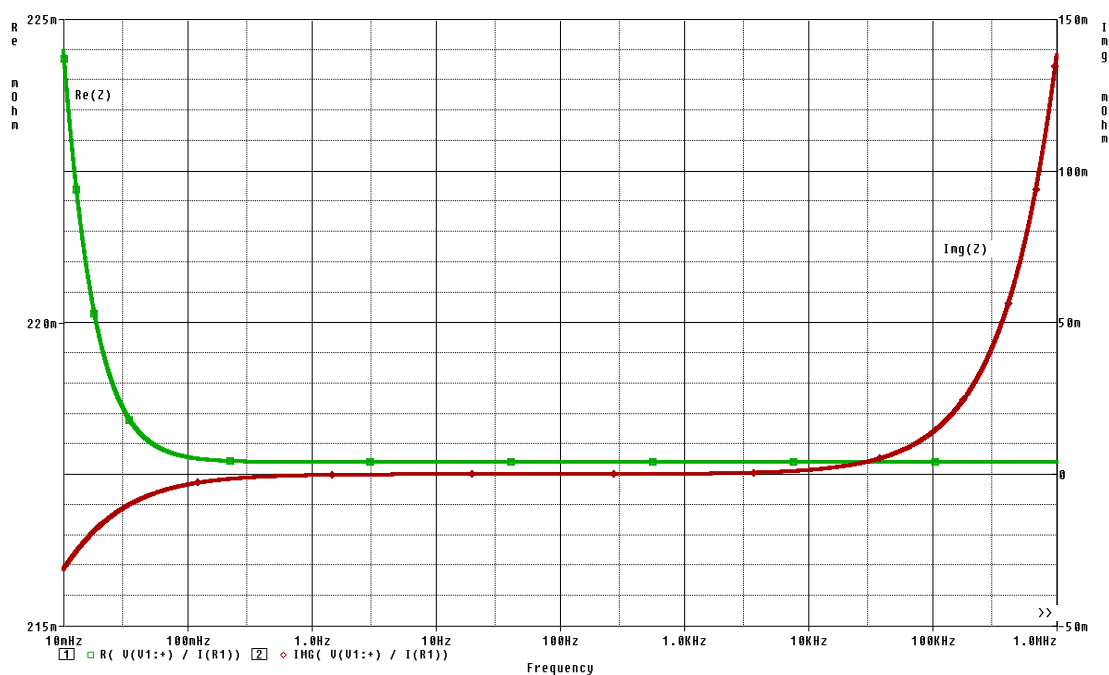


Obr.35: Průběh $Re(Z)$ složky a $Img(Z)$ složky pro BCAP 2000 v Nyquistově rovině

Příloha 6. Průběh simulace pro žebříkový model

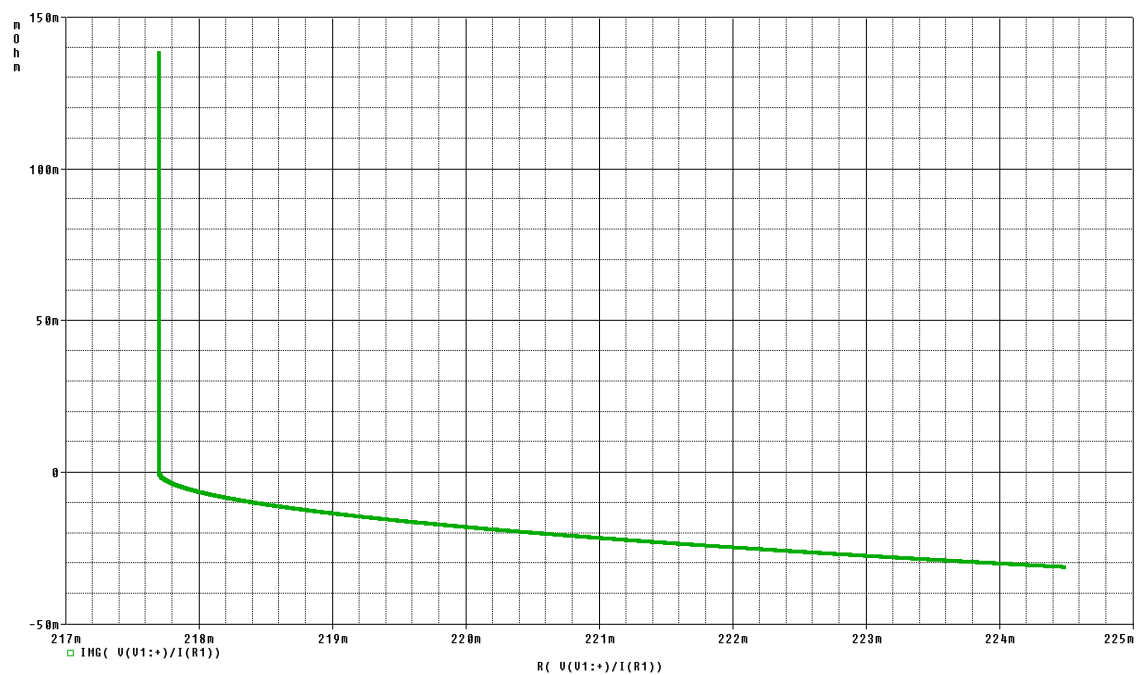


Obr.36: Průběh impedance a fáze pro BCAP 1200

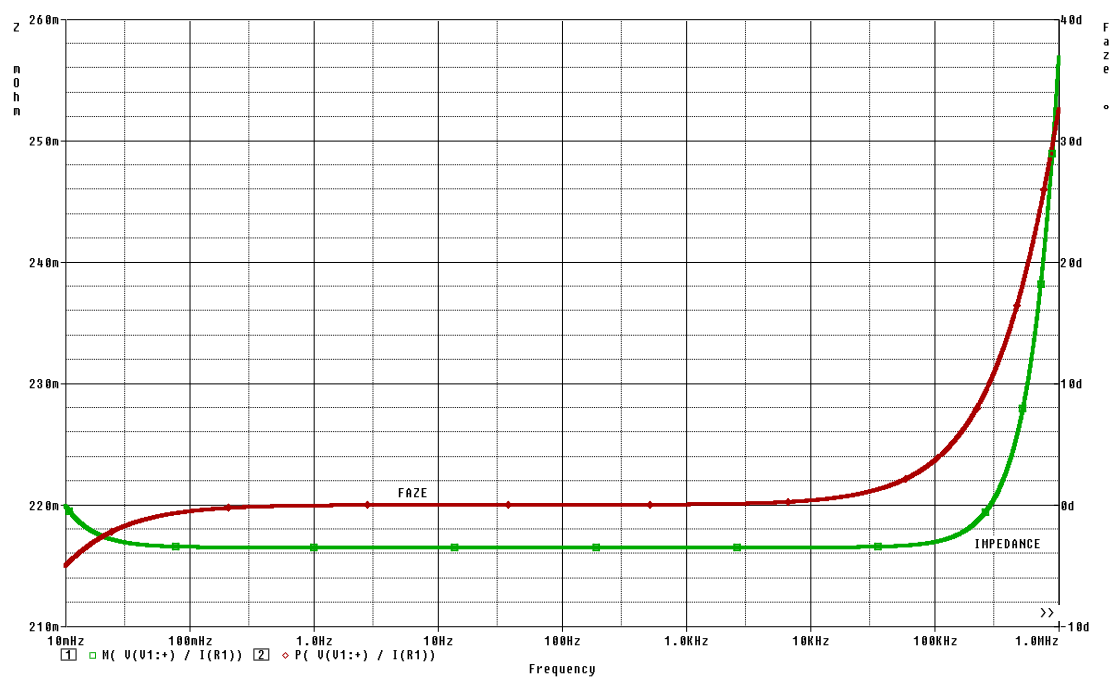


Obr.37: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro BCAP 1200

Příloha 6. Průběh simulace pro žebříkový model

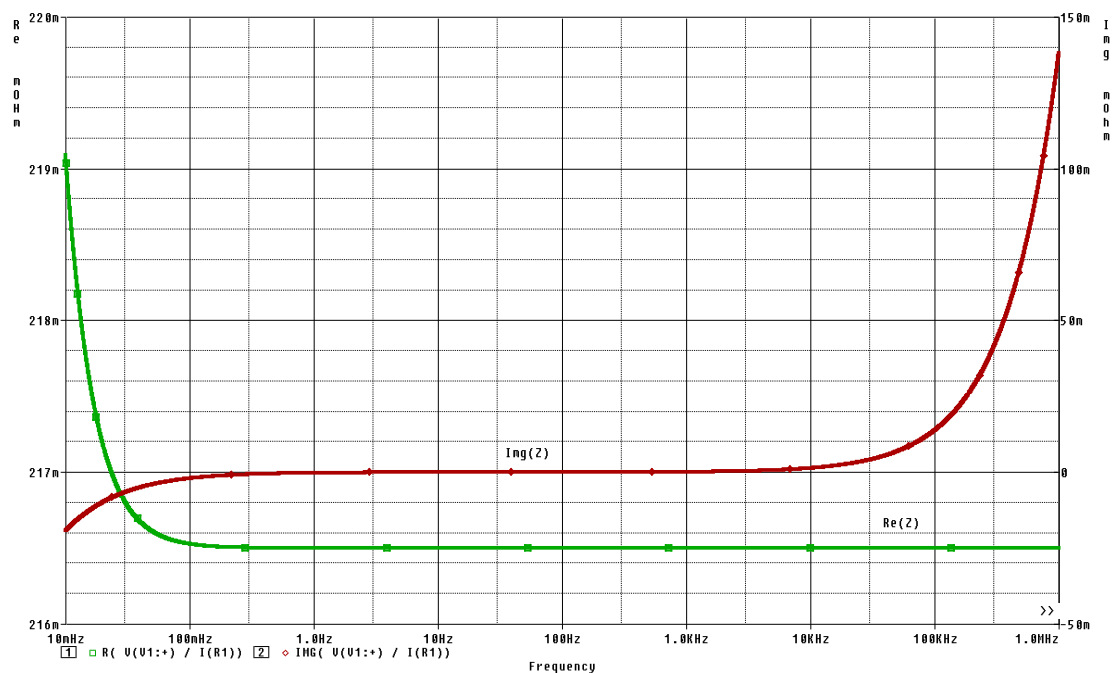


Obr.38: Průběh $\text{Re}(Z)$ složky a $\text{Im}(Z)$ složky pro BCAP 1200 v Nyquistově rovině

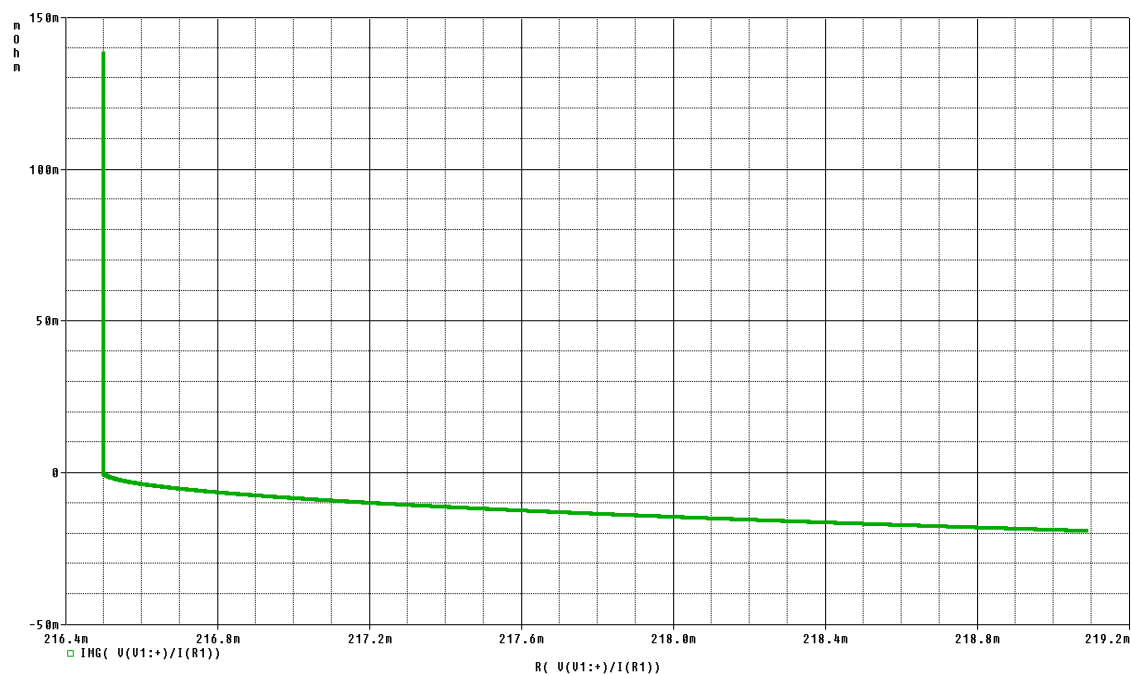


Obr.39: Průběh impedance a fáze pro BCAP 2000

Příloha 6. Průběh simulace pro žebříkový model

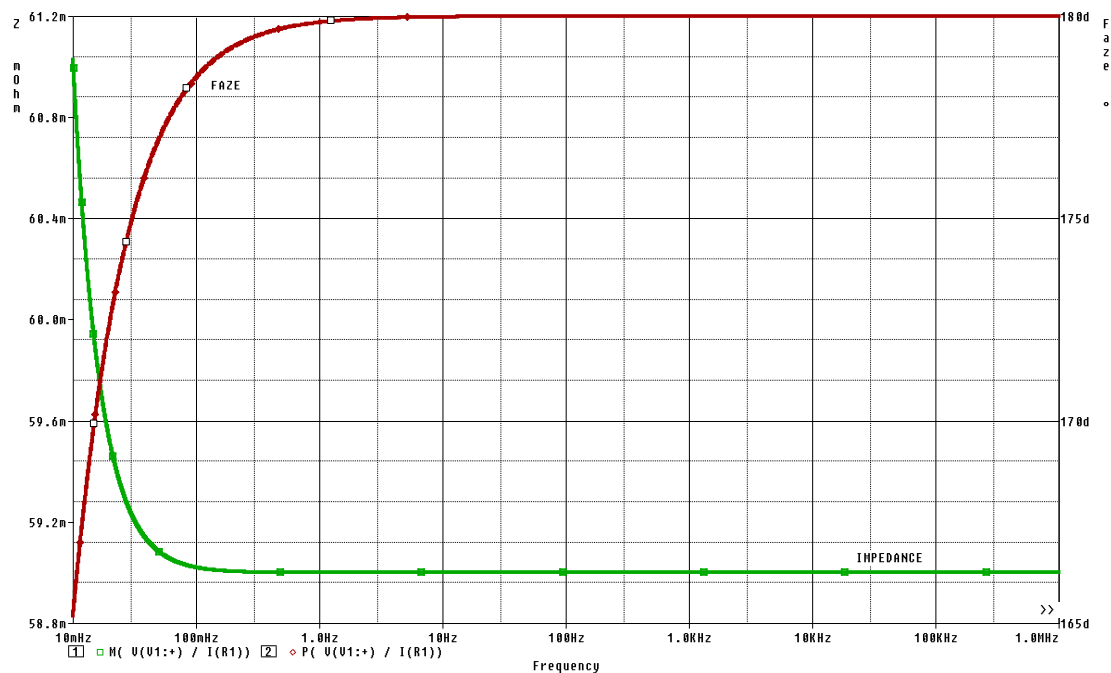


Obr.40: Průběh $Re(Z)$ složky a $Img(Z)$ složky pro BCAP 2000

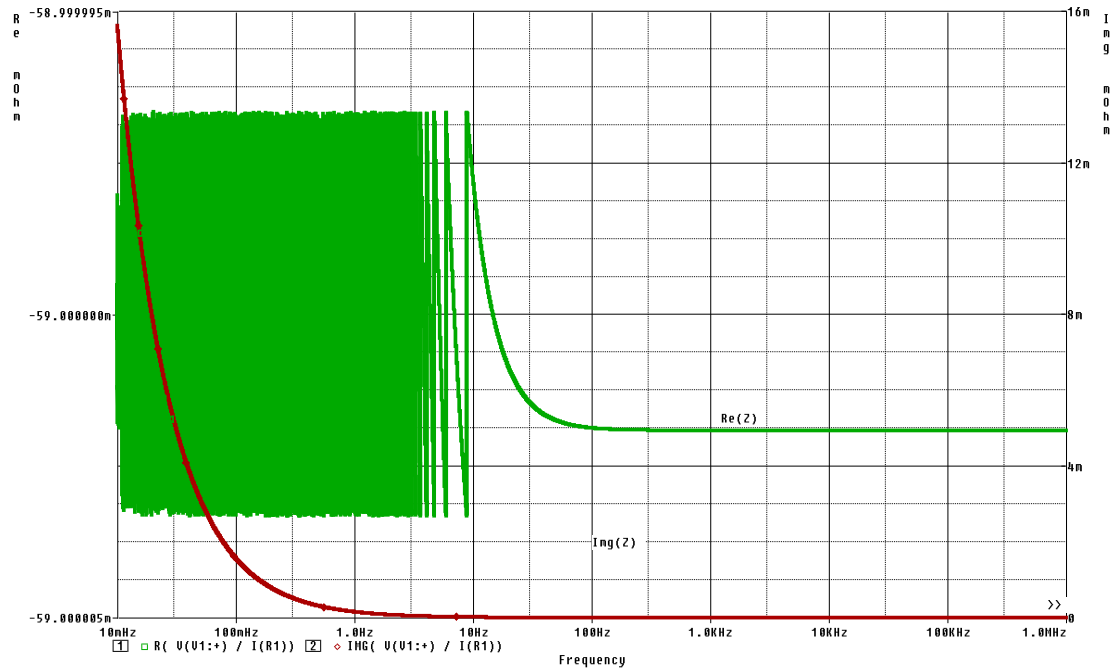


Obr.41: Průběh $Re(Z)$ složky a $Img(Z)$ složky pro BCAP 2000 v Nyquistově rovině

Příloha 7. Průběh simulace modelu o dvou větvích



Obr.42: Průběh impedance a fáze pro BCAP 1200

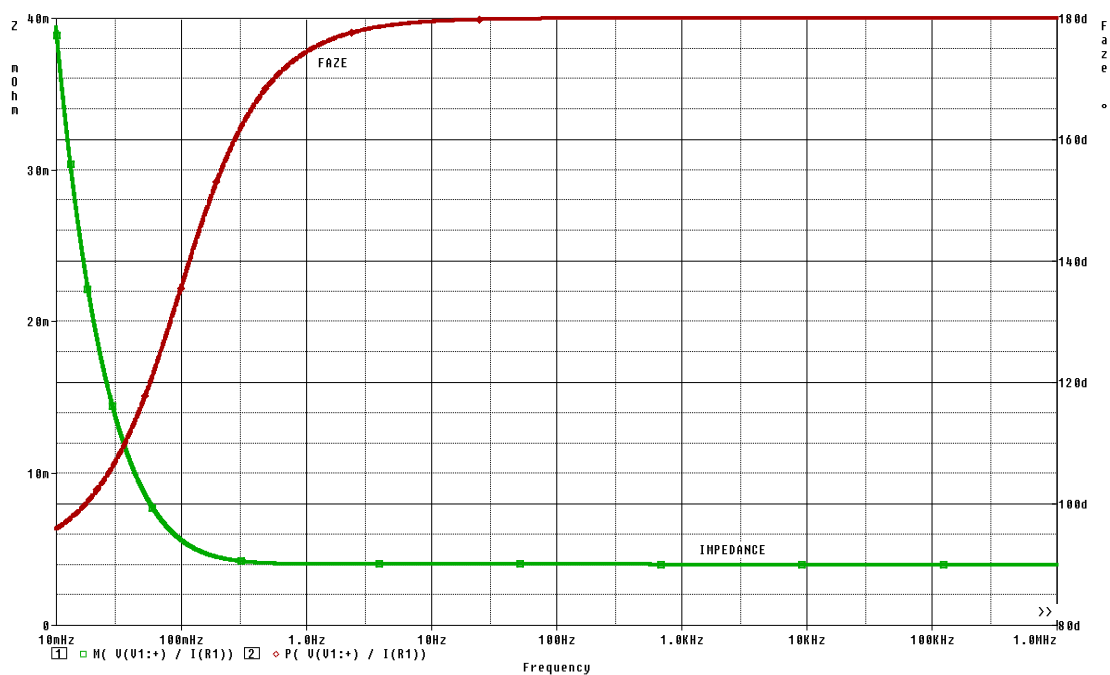


Obr.43: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro BCAP 1200

Příloha 7. Průběh simulace modelu o dvou větvích

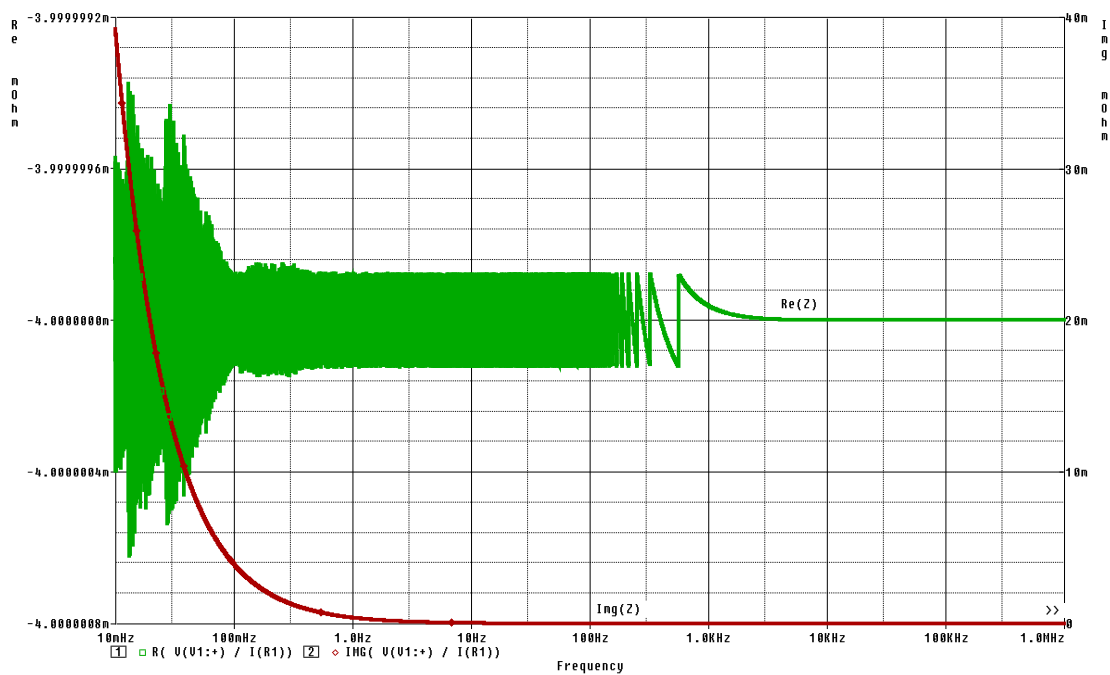


Obr.44: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro BCAP 1200 v Nyquistově rovině

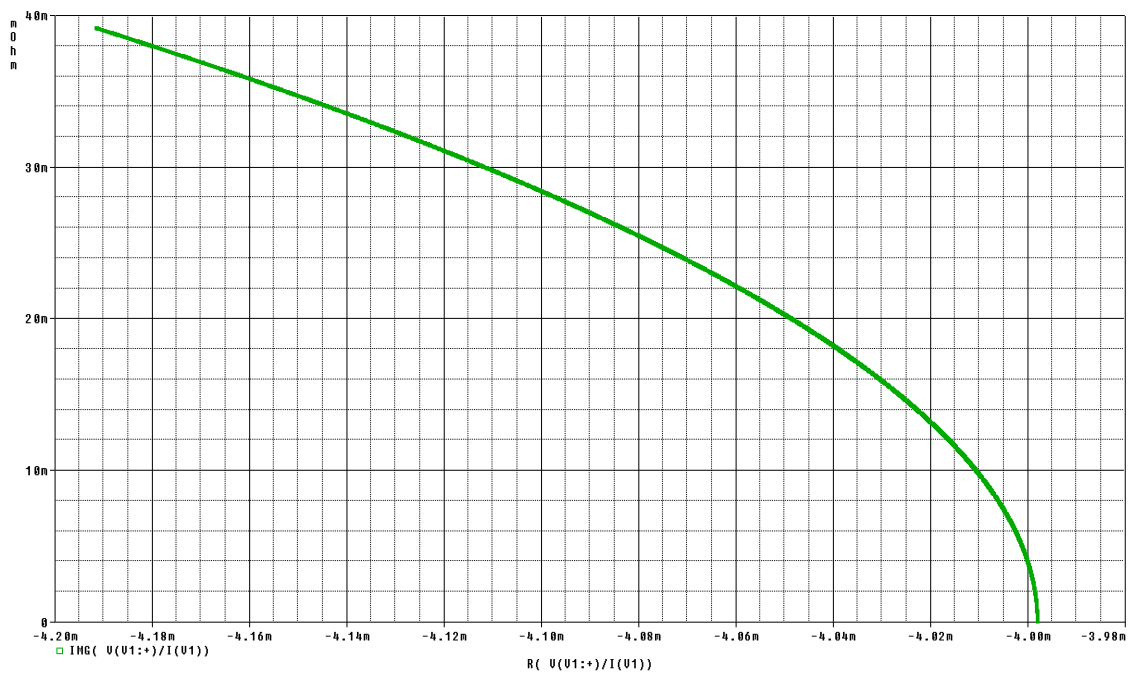


Obr.45: Průběh impedance a fáze pro převzaté hodnoty

Příloha 7. Průběh simulace modelu o dvou větvích



Obr.46: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro převzaté hodnoty



Obr.47: Průběh $Re(Z)$ složky a $Im(Z)$ složky pro převzaté hodnoty v Nyquistově rovině